MÉTAUX ET ALLIAGES

OUVRAGES DE M. LE GÉNÉRAL GRARD

L'Acier. *Aviation. Automobilisme. Constructions mécaniques. Sanctions de la guerre.* 2e édition. 1921. Volume grand in-8, avec 113 figures et 21 planches. . . . . **30** fr.

L'Aluminium et ses alliages. *Étude rationnelle des caractéristiques et des traitements thermiques. Applications industrielles.* 1920. Volume grand in-8, avec 87 figures et 25 planches hors texte . . . . **30** fr.

Aciers à outils. *Procédés de MM. Taylor et White.* 1908. In-8, avec 29 figures (*Épuisé*)

Cuivre et laitons à cartouches. *Essais mécaniques et micrographiques.* Préface de M. G. Charpy. 1909. Vol. in-8, avec 15 figures et 22 planches in-4. . . . . **9** fr.

Recherches sur la dureté et la fragilité des Aciers. 1911. Brochure in-8, avec 9 figures et 3 planches hors texte . . . . **2** fr. **75**

(*Berger-Levrault, Éditeurs*)

GÉNÉRAL **C. GRARD**
INSPECTEUR GÉNÉRAL
DE L'AÉRONAUTIQUE

J. COURNOT
PROFESSEUR
A L'ÉCOLE SUPÉRIEURE D'AÉRONAUTIQUE

MÉTAUX ET ALLIAGES

TOME I

Avec 131 figures dans le texte

PARIS
ÉDITIONS BERGER-LEVRAULT
5, RUE AUGUSTE-COMTE (VI[e])
1930

COPYRIGHT BY ÉDITIONS BERGER-LEVRAULT, 1929

Tous droits de traduction, de reproduction et d'adaptation réservés pour tous pays.

AVANT-PROPOS

Le général Grard, inspecteur général de l'Aéronautique, et M. l'ingénieur Cournot ont assuré, depuis 1921, l'enseignement de la métallurgie à l'École supérieure d'Aéronautique.

Depuis cette époque, chaque année a apporté dans le domaine métallurgique son contingent de progrès et de réalisations nouvelles.

L'Aéronautique, notamment, a affirmé son orientation vers la construction métallique.

Ayant nettement précisé et fait connaître ses besoins, elle a été naturellement l'instigatrice de progrès métallurgiques considérables dont on la savait la première bénéficiaire.

C'est ainsi que le bon fonctionnement des moteurs d'aviation donnant à la notion de la *zone thermique de travail* une importance considérable, des études de laboratoire ont été entreprises et des aciers spéciaux ont été élaborés permettant de donner satisfaction à ces exigences.

La nitruration, durcissement superficiel des aciers, appliquée aux cylindres des moteurs, a eu pour résultat d'assurer la conservation de la puissance en augmentant l'endurance.

D'une façon générale, la recherche de la sécurité dans la légèreté, si capitale pour l'Aéronautique, a poussé les métallurgistes à élaborer des aciers dont les constituants appropriés permettent de concilier des exigences éminemment contradictoires.

Les alliages légers et ultra-légers ont donné lieu à de nombreuses études destinées à améliorer leurs caractéristiques et à préciser la technique de leur traitement et de leur emploi.

Pour tous les métaux et alliages, s'est posée la question capitale de leur conservation dans les différents milieux et aux diverses températures. C'est l'important problème de l'oxydabilité et de la corrosion dont la solution est recherchée, à l'heure actuelle, dans de nombreux laboratoires. Des réalisations industrielles intéressantes sont dès maintenant obtenues. Elles sont complétées par des procédés de protection qui sont un adjuvant précieux à la résistance constitutionnelle des alliages à cette dangereuse altération.

Dans d'autres domaines encore, le progrès est sensible et se poursuivra sans arrêt.

Mais, d'ores et déjà, il a paru nécessaire aux auteurs de faire le point et de publier dans un but didactique et documentaire le présent ouvrage.

Le premier volume est relatif à la Métallurgie générale et expérimentale.

Le deuxième volume est relatif à la Sidérurgie et la Métallurgie des métaux et alliages non ferreux.

Au cours de l'exposé, et au fur et à mesure des besoins, chaque auteur a invoqué les études auxquelles il s'était spécialement livré.

C'est ainsi que l'inspecteur général Grard a fait un large appel à ses travaux antérieurs :

Cuivre et Laitons à cartouches (1),
L'acier (2),
L'aluminium et ses alliages (3),

à ses recherches sur les aciers spéciaux, métaux et alliages légers, en renvoyant pour plus ample documentation les lecteurs à ces ouvrages eux-mêmes.

---

(1) Berger-Levrault, éditeurs.
(2) Berger-Levrault, 1919, éditeurs.
(3) Berger-Levrault, 1920, éditeurs.

L'ingénieur Cournot a rappelé ses expériences sur le revêtement des métaux et alliages (1), sur la viscosité des métaux (2), expériences tout à fait à l'ordre du jour et susceptibles d'applications pratiques immédiates.

Certaines parties ont donné lieu à un développement plus considérable que certaines autres. Cette disproportion a été volontaire.

Les auteurs ont, en effet, voulu s'étendre d'une façon particulièrement détaillée sur les procédés nouveaux ou sur l'évolution des produits métallurgiques qui jouent actuellement un rôle primordial dans la construction aéronautique, dont les exigences sont les plus impératives.

« Faire le point », avons-nous dit, a été le but de cet ouvrage qui résume l'état de la Métallurgie en 1930.

Des compléments pourront être apportés dès que la nécessité s'en fera sentir, de façon à doter aussi longtemps que possible cet ouvrage d'une qualité indispensable en pareille matière : « l'actualité ».

Les Éditeurs.

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. 182, p. 696; t. 183, p. 789; t. 183, p. 1289; t. 184, p. 1172, t. 184, p. 1250; t. 185, p. 1041; t. 185, p. 773; t. 187, p. 298,

(2) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. 181, p. 661, t. 183, p. 885; t. 185, p. 650.

METALLURGIE GENERALE

TITRE I

THÉORIE DES ALLIAGES

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS SUR LES STRUCTURES
LOIS PHYSICOCHIMIQUES

§ 1. GÉNÉRALITÉS SUR LES STRUCTURES. — Les métaux et alliages sont constitués, à l'état solide, par des agrégats de cristaux généralement très petits. Ces cristaux ne sont pas forcément tous de même nature chimique et on peut les ranger en trois catégories :

1° Les cristaux de métaux purs;

2° Les cristaux de combinaisons chimiques définies;

3° Les cristaux de solutions solides où les métaux sont dissous les uns dans les autres d'une manière homogène.

Un alliage peut être constitué d'une seule espèce de cristaux, ou d'un assemblage de deux ou plusieurs espèces : ce sont ces *structures* que représenteront les graphiques appelés diagrammes d'équilibre, du moins pour les états stabilisés.

On voit que les solutions solides ont seules des compositions chimiques non déterminées *a priori* et pouvant souvent évoluer dans de très larges limites, par opposition avec les combinaisons,

corps chimiques définis se comportant en somme comme des métaux purs, avec des compositions fixes et invariables.

Lorsqu'un métal ou un alliage, pris à l'état liquide, est refroidi en vue de sa solidification, il se produit à un certain moment dans la masse liquide des germes solides infiniment petits qui se développent et amorcent la solidification; ces germes se révèlent en quantité d'autant plus grande que la vitesse de refroidissement est plus rapide; ces développements solides, à partir de ces centres de cristallisation, finissent par se heurter, et chacun d'eux donne ainsi, lorsque la masse est entièrement prise, ce que l'on appelle un *grain*.

Cette transformation caractérise le passage de l'état liquide à l'état solide.

Mais à l'état solide même, *il peut* y avoir aussi des transformations, le métal ou l'alliage ayant, au-dessus d'une température dite de transformation à l'état solide, une certaine structure et se transformant par refroidissement lent pour adopter, au-dessous de cette température, une autre structure.

La transformation inverse se produit au chauffage.

Parfois la transformation n'a pas lieu à une température unique. mais se produit progressivement dans un intervalle de température, bien déterminé lui aussi.

Tous ces états structuraux, toutes ces évolutions, sont régis, dans une certaine mesure, par des lois dont les principales sont les suivantes :

§ 2. LOIS. — *Loi des phases.* — La loi des phases ou de Gibbs est exprimée par la formule :

$$V = n + p - \varphi$$

Nous allons préciser chacun de ces termes.

V est le nombre de variances d'un système chimique en équilibre, c'est-à-dire le nombre de facteurs d'équilibre *indépendants.*

Le système chimique est dit en équilibre, lorsque les réactions ou modifications chimiques internes dont il peut être le siège, sont complètement achevées.

Prenons, à une température t déterminée, de l'eau et un sel soluble; il y aura dissolution du sel dans l'eau. Il arrivera un certain moment où, pour cette température, la quantité de sel ajoutée

produira la saturation. A ce moment et pour cette température, il y aura équilibre chimique.

Faisons varier la température. Il y aura rupture d'équilibre caractérisée par précipitation ou possibilité de nouvelle dissolution du sel.

La température est donc une variable indépendante, puisque à chaque température, correspond un état d'équilibre déterminé. Le nombre de ces facteurs d'équilibre indépendants constitue la variance du système.

n représente le nombre de composés *indépendants*. Dans un alliage binaire $n = 2$. Il faut prendre garde à cette indépendance des composés ; si un élément était déterminé par d'autres éléments en présence, il ne devrait pas être compté dans le nombre n.

p représente le nombre des conditions extérieures pour lesquelles le système peut se mettre en équilibre (température, pression, force électrique, etc...).

φ représente le nombre de *phases*, c'est-à-dire le nombre de *masses homogènes* obtenues avec le même groupe de substances constituantes, dans un état de composition correspondant à un état thermo-dynamique déterminé, abstraction faite de la grandeur et de la forme de ces masses.

Un système est *hétérogène* lorsqu'il se compose de plusieurs parties homogènes non miscibles, la miscibilité aboutissant à l'homogénéité.

Exemple : eau et huile, soit par couches superposées, soit l'huile répartie dans l'eau en gouttelettes aussi fines que possible.

C'est là un système à deux phases.

Si un système est composé de trois ou quatre substances homogènes non miscibles, il est à trois ou quatre phases.

Les miscibilités complètes ou partielles influent sur le nombre de phases.

Quoi qu'il en soit, les phases peuvent être solides, liquides ou gazeuses.

Application de la loi de Gibbs aux alliages.

$p = 1$, à savoir la température, les modifications subies ayant lieu presque toujours à la pression atmosphérique.

La loi de Gibbs devient donc :

$$V = n + 1 - \varphi$$

$V < O$, aucun équilibre à aucune température;
$V = O$, un seul équilibre à une température définie;
$V = 1$, un état d'équilibre pour chaque température;
$V = 2$, la fixation de la température ne suffit pas à définir l'équilibre. Il faut adjoindre une autre variable.

Métal pur. — $n = 1$; max. φ en équilibre $= 2$; sinon, $V < O$.

Si $\varphi = 2$, une seule température d'équilibre. C'est la température de fusion ou de solidification d'un métal, où il y a coexistence de la phase solide et de la phase liquide. Ce peut être encore sa température d'ébullition.

C'est encore le cas de transformations allotropiques, où il peut y avoir coexistence à la température de transformation, de formes solides α et β non miscibles.

Alliage binaire. — $n = 2$: max. φ en équilibre $= 3$; sinon, $V < O$.

Pour $\varphi = 3$, $V = O$: donc une seule température d'équilibre.

Exemple : étain solide, bismuth solide; liquide bismuth-étain. La température d'équilibre est de 143°. L'alliage liquide comprend 55 % de bismuth et 45 % d'étain.

$\varphi = 2$, $V = 1$. La température est une variable indépendante. Une fois choisie, l'état d'équilibre est défini et la composition des phases déterminée.

Pendant la solidification d'un alliage de deux métaux, et pour une température déterminée et maintenue constante, on a une partie liquide et une partie solide, c'est-à-dire deux phases contenant chacune une proportion *définie* des métaux constituants.

Loi de l'équilibre. — Loi de Le Châtelier.

« La modification produite dans un système en équilibre par une variation d'un des facteurs d'équilibre est de nature telle, qu'elle s'oppose à la cause qui la détermine. »

Cette loi est relative à l'équilibre stable.

Loi de Van t'Hoff.

« Toute élévation de température produit, sur un système chimique en équilibre, une transformation correspondant à une absorption de chaleur, c'est-à-dire qui amènerait un abaissement de température si elle se produisait seule, et inversement dans le cas d'un abaissement de température. »

Autrement dit : à l'échauffement, toute réaction réversible est accompagnée d'une absorption de chaleur, c'est-à-dire est endothermique, et, au refroidissement, elle est accompagnée d'un dégagement de chaleur, c'est-à-dire exothermique.

Il existe une loi analogue relative à la pression.

Courbes de refroidissement. — La loi de Van t'Hoff trouve son application dans l'établissement des courbes de refroidissement.

Après avoir porté un échantillon de métal pur à une certaine température, laissons-le refroidir.

Observons le refroidissement avec un pyromètre.

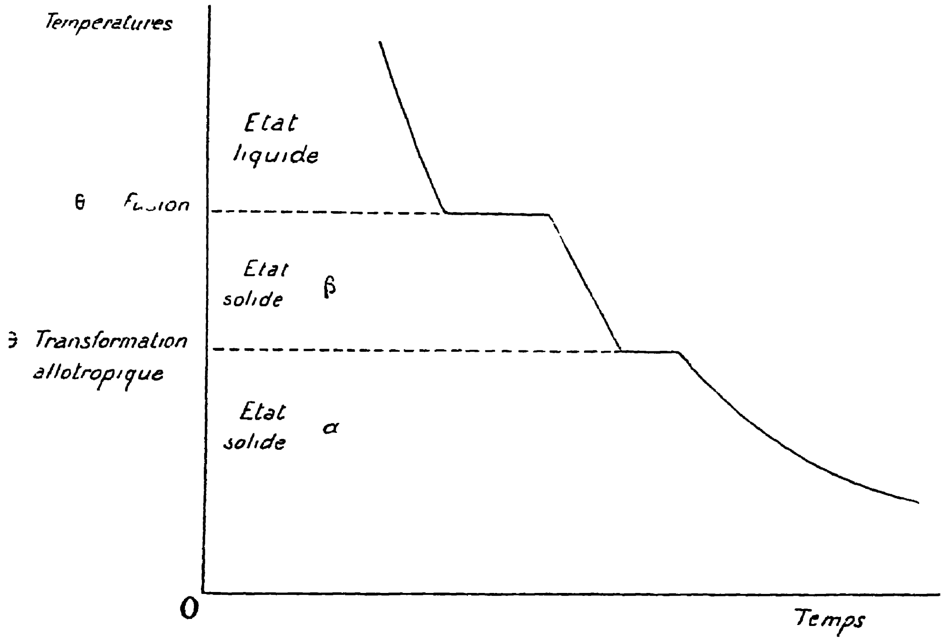


Fig. 1.
Exemple de courbe de refroidissement d'un métal pur.

Enregistrons le phénomène en traçant la courbe de refroidissement, portant en ordonnées les températures T, en abscisses les temps *t;* nous remarquons en général un ou plusieurs paliers dans la courbe de refroidissement (fig. 1).

Ils correspondent à des dégagements de chaleur accompagnant des transformations, changements d'état, modifications allotropiques.

Si le refroidissement est lent, le dégagement de chaleur, compensant les pertes extérieures de chaleur, est indiqué par un palier de la courbe.

Si le refroidissement est très énergique, la compensation peut

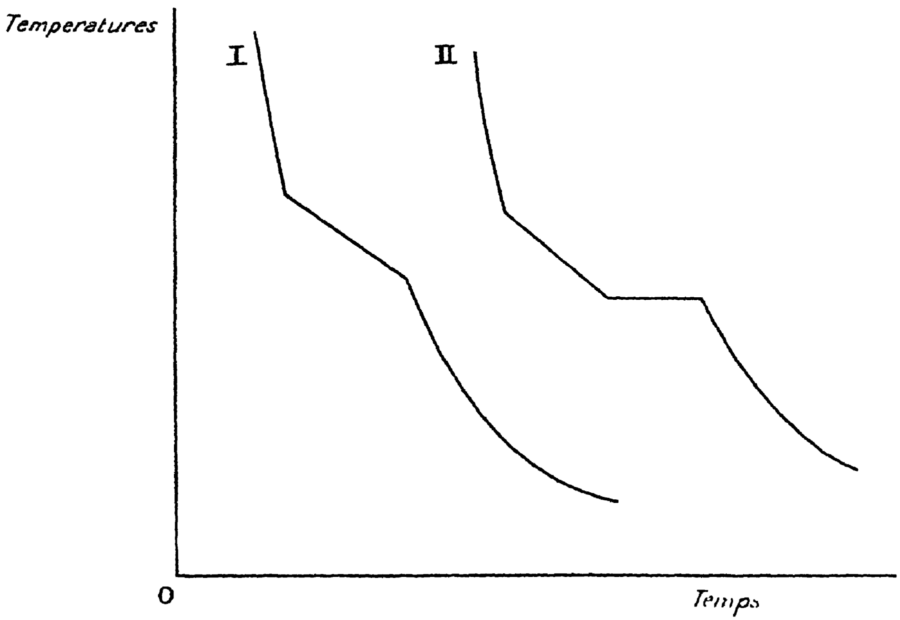


Fig. 2.
Exemples de courbes de refroidissement d'alliages.

être insuffisante et il y a seulement une inflexion de la courbe, et non un palier.

Dans les courbes de refroidissement ou de chauffage des alliages, on a également des paliers lorsque la variance est nulle; lorsque la variance est égale à 1, on a des infléchissements de la courbe (fig. 2-I); on peut enfin avoir les deux phénomènes successivement (fig. 2-II).

CHAPITRE II

ÉTUDE DE LA SOLIDIFICATION DES ALLIAGES DIAGRAMMES D'ÉQUILIBRE (1)

§ 1. Solidification des alliages binaires. — Considérons un alliage de deux métaux A et B. Sa composition chimique peut varier de

100 % A 0 % B

à

0 % A 100 % B

Si on a x % de B, on a $(100 - x)$ % de A, de sorte que la seule connaissance de x déterminera la composition ou concentration de l'alliage.

Dans les métaux fondus, on peut distinguer trois cas :

1° Miscibilité complète à l'état fondu, c'est-à-dire, formation d'un liquide unique, homogène. C'est le cas de presque tous les alliages industriels.

2° Absence absolue de miscibilité à l'état fondu (aluminium et plomb), comme l'huile et l'eau.

La superposition se fait par ordre de densité.

3° Miscibilité partielle à l'état fondu. On a deux phases liquides contenant A et B, l'une de concentration x_1 % de B et l'autre de concentration x_2 % de B.

Ce phénomène est rare pour les alliages industriels (alliage de

---

(1) Pour l'étude complète des diagrammes d'équilibre, voir : Guillet, *Les méthodes d'étude des alliages métalliques*. Librairie Dunod et Pinat. 1925; Rengade, *Analyse thermique*. Librairie Hachette, 1909.

zinc et de plomb). Nous ne nous appesantirons pas sur ces deux derniers cas.

Cas de la solidification de deux métaux complètement miscibles à l'état liquide. — 1° *Métaux complètement miscibles à l'état solide.* — Soient deux métaux A et B à l'état de concentration x % de B et portés à une température les mettant à l'état de liquide homogène.

Laissons refroidir cet alliage jusqu'à solidification.

Dans un certain intervalle de température, compris entre la température de solidification commençante et la température de

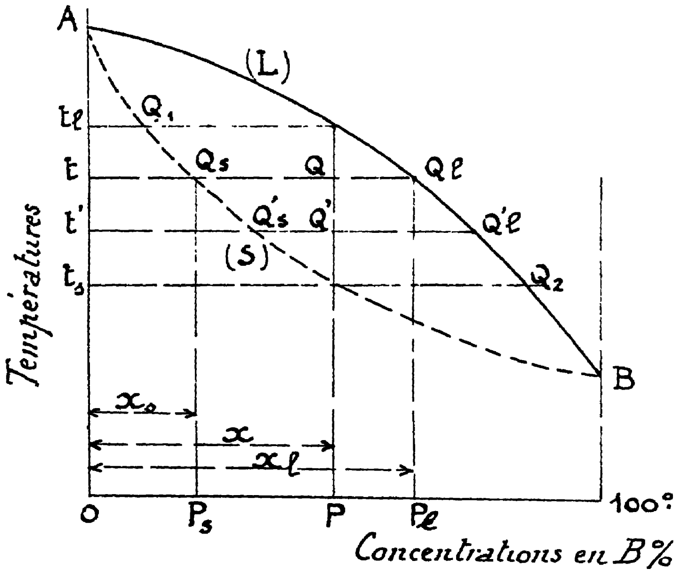


Fig. 3.
Forme I de Roozeboom.

solidification finissante, l'alliage est partie liquide, partie solide. Il est hétérogène. Il y a deux phases, solide et liquide, pouvant coexister en équilibre à une température déterminée, la phase solide ayant une concentration x_s % de B, et la phase liquide ayant une concentration x_l % de B, correspondant respectivement aux points Q_s et Q_l du diagramme (fig. 3).

Si on fait varier la température, les lieux géométriques des points Q_s et Q_l seront les courbes S et L, dénommées respectivement par

Roozeboom : « Solidus » et « Liquidus ». Donc, pas de point de fusion, mais intervalle de fusion.

Le rapport des poids des phases solide et liquide est donné par :

$$\frac{P_s}{P_l} = \frac{QQ_l}{QQ_s} \text{ (1)}$$

Pour t_l, température de commencement de solidification, la phase solide est nulle.

Pour t_s, température de fin de solidification, la phase liquide est nulle.

La phase solide constitue une *solution solide* qui doit se modifier par diffusion dans l'intervalle des températures t_s et t_l. Mais la vitesse de diffusion dans l'élément solide est très lente. Il n'y a pas homogénéisation, mais composition variable du centre à la surface, cette hétérogénéité croissant avec l'intervalle de solidification, la vitesse de refroidissement et la difficulté de diffusion.

Certains traitements thermiques sont nécessaires pour procurer l'homogénéité indispensable.

Formes de Roozeboom. — Roozeboom a donné trois forme types dans le cas de dépôt d'une solution solide.

La forme I indiquée dans le diagramme précédent (fig. 3).

La forme II présentant un maximum du liquidus (fig. 4).

La forme III présentant un minimum du liquidus (fig. 5).

Le solidus passe par ces maximum et minimum.

Les courbes ont une tangente commune horizontale en ces points.

Dans tous ces dépôts de solutions solides, les courbes température-temps des chauffages ou refroidissements présentent des ralentissements pour la zone entre solidus et liquidus par suite de la réaction respectivement endothermique ou exothermique (fig. 2-I).

---

(1) En effet, l'alliage étant à x % de B, la phase liquide contient x_l % de B et la phase solide x_s % de B.

Si P est le poids total de l'alliage, P_s le poids de la phase solide, P_l le poids de la phase liquide, on a $P = P_s + P_l$

d'où $$Px = P_s x_s + P_l x_l$$

$$\frac{P_s}{P_l} = \frac{x_l - x}{x - x_s} = \frac{QQ_l}{QQ_s}$$

2° *Métaux présentant à l'état solide une miscibilité partielle ou deux espèces de solutions solides — ou lacune de miscibilité* (fig. 6). A l'état solide, deux solutions se forment, l'une α riche en métal A, l'autre β riche en métal B. Nous trouvons un liquidus (L_1) et un solidus (S_1) correspondant à la solution α, issus du point de solidi-

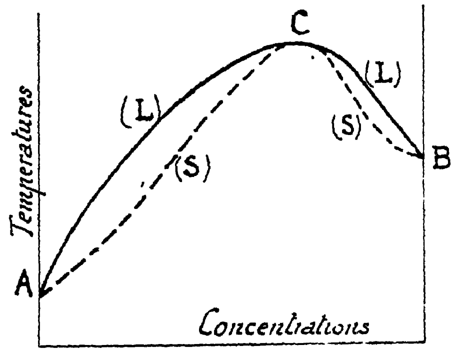


Fig. 4.
Forme II de Roozeboom.

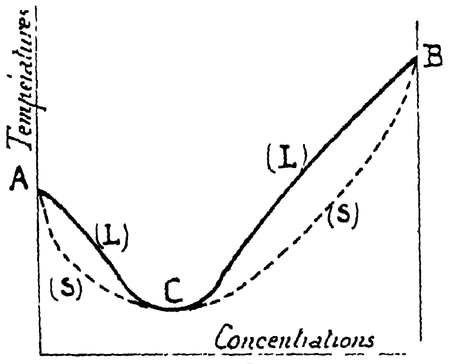


Fig. 5.
Forme III de Roozeboom

fication du métal A; puis un liquidus (L_2) et un solidus (S_2) correspondant à la solution β, issus du point de solidification du métal B.

Les liquidus se coupent en E, correspondant à une température T pour laquelle le mélange liquide, de composition donnée par ξ, abscisse de E, est en équilibre avec une solution solide de composition x_1, abscisse de e_1 et une solution solide de composition x_2, abscisse de e_2 : d'où trois phases en équilibre, de concentration ξ,

x_1 et x_2, pour une seule temperature déterminee T, l'une des phases au moins disparaissant lorsque la température se modifie.

La lacune de miscibilité s'étend entre e_1 et e_2.

Le point E peut se trouver entre e_1 et e_2 ou en dehors du segment e_1 e_2, c'est-à-dire que la température T du point E peut être infé

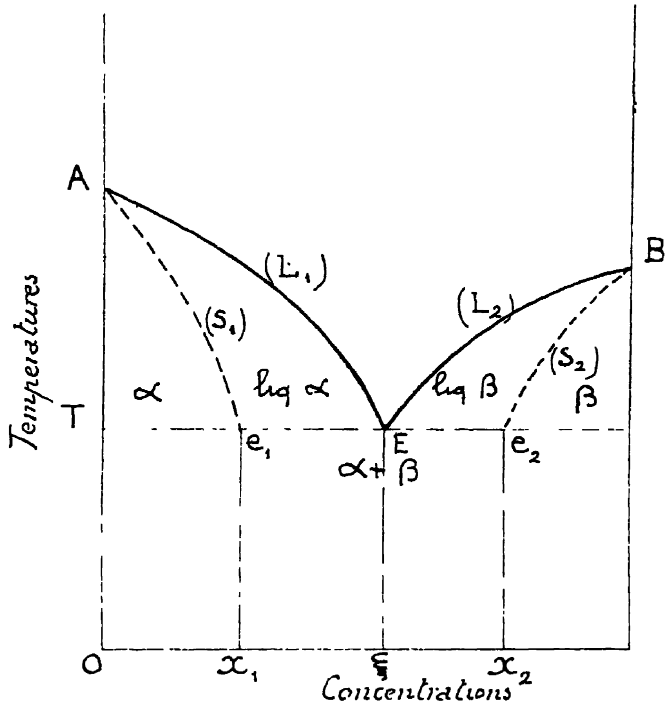


Fig. 6.

Point d'eutexie

rieure aux temperatures de fusion des métaux A et B ou intermédiaire entre ces deux températures.

Dans le premier cas, le point E est un *point d'eutexie* et le composé solide à deux phases auquel il donne naissance est dit *eutectique ;* c'est un agrégat de fins cristaux des deux phases; dans le second cas, le point E est un *point de transition* (fig. 7).

Dans le second cas, le liquide β se trouve toujours sous la courbe E B et par conséquent ne fait son apparition qu'au-dessous de la température T.

C'est ce qui explique le nom de point de transition.

Au-dessus de T, il n'y a que la solution α en présence du liquide,

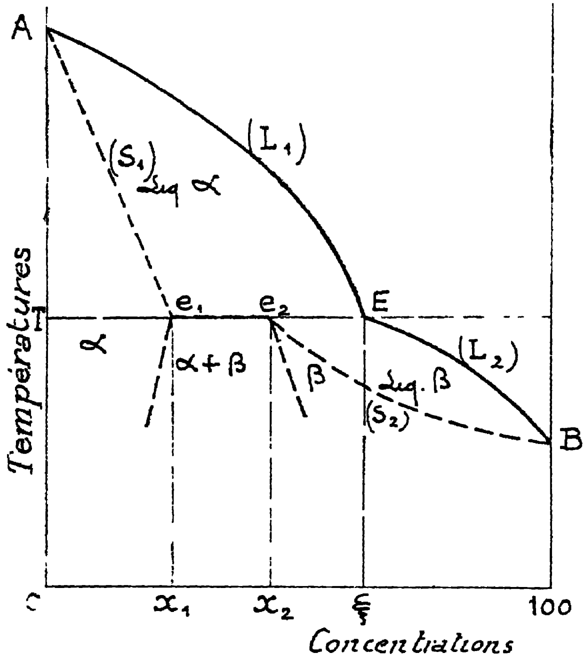


Fig. 7

Point de transition.

et, au-dessous de T, il n'y a que de la solution β en présence du liquide.

Au point T, on a :

Solution solide α de teneur e_1,

Solution solide β de teneur e_2,

Et liquide E de concentration ξ. La lacune de miscibilité s'étend entre e_1 et e_2.

Les alliages dans lesquels il y a dépôt eutectique présentent sur leurs courbes de refroidissement un palier (variance nulle) à la température de l'eutectique (fig. 2-II).

Au lieu d'avoir miscibilité partielle, on peut avoir *lacune complète de miscibilité ;* le diagramme de la figure 4 peut ainsi devenir celui de la figure 8 où l'on a dépôt des métaux purs A et B ; le solidus

est alors constitué par les segments de droite AC_1, C_1E, EC_2, C_2B:

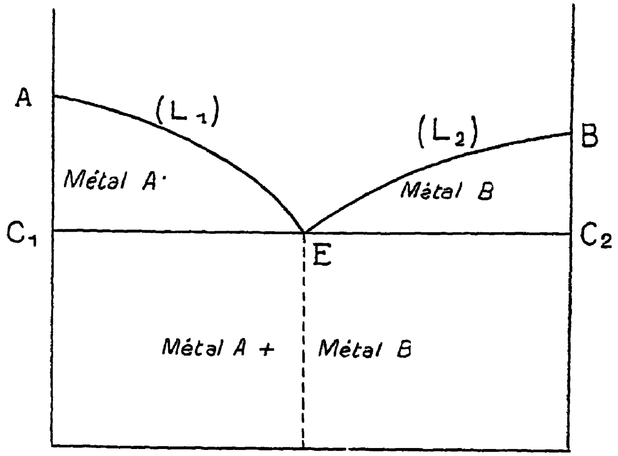


Fig. 8.

l'eutectique est un fin agrégat de cristaux de métal A et de cristaux de métal B.

Tel est le cas des alliages plomb-antimoine, étain-bismuth, argent-plomb, zinc-étain, etc.

Enfin, on peut avoir d'un côté dépôt de métal pur, de l'autre formation d'une solution solide.

Cas de plusieurs solutions solides. — Combinaison. — Si nous avons formation de trois solutions solides, il y a trois branches de liquidus et trois branches de solidus. Les branches de liquidus se couperont et, suivant le mode d'intersection, nous aurons des points d eutexie et des points de transition.

Voir diagramme donnant deux points d'eutexie (fig. 9).

Ce diagramme se commente de lui-même. A remarquer la courbe liquidus intermédiaire, forme II de Roozeboom, présentant un maximum où liquidus et solidus ont une tangente horizontale commune. L'alliage correspondant se comporte comme un métal pur. Pas d'intervalle de solidification. On a un composé défini ou *combinaison*.

Cette combinaison peut d'ailleurs se déposer elle-même, sans donner lieu à solution solide.

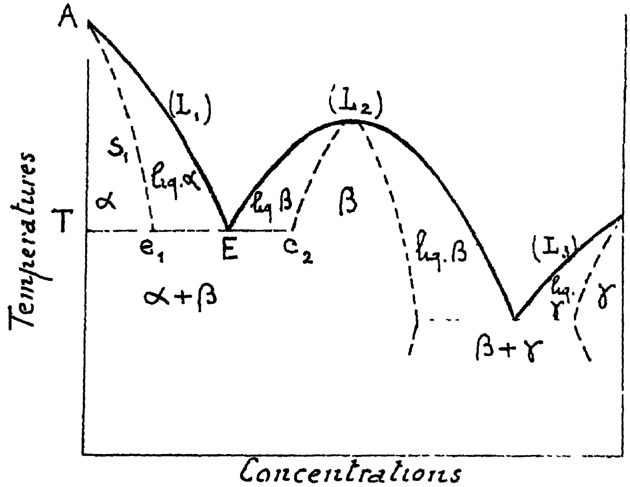


FIG. 9.

3 solutions solides — 2 points d'eutexie.

§ 2. PHÉNOMÈNES DE TRANSFORMATION A L'ÉTAT SOLIDE. — Il peut y avoir des modifications de la constitution physico-chimique de l'alliage, susceptibles de changer la structure et les propriétés de l'alliage, après solidification.

Il faut tenir compte des éléments retardateurs de transformation, résistances passives ayant en particulier leur origine dans la viscosité du milieu solide. On arrive à des états hors d'équilibre, auxquels on remédie par des traitements thermiques.

Transformations allotropiques. — 1° *Métaux.* — Les métaux purs eux-mêmes subissent souvent, à des températures définies, des transformations allotropiques, modifiant leur état cristallin et leurs propriétés. Le fer se présente sous les aspects Fer α, Fer β, Fer γ, Fer δ. Le nickel présente une variété magnétique α qui, vers 320°, se transforme en une variété non magnétique β, etc...

Cette transformation se fait à une température constante, donc indiquée sur le diagramme de refroidissement.

2º *Solutions solides.* — Un métal A et un métal B peuvent former des solutions non miscibles, se comportant comme une solution solide de deux métaux en équilibre avec une phase liquide de ces deux métaux.

Au refroidissement, on aura des courbes de commencement de transformation et des courbes de fin de transformation analogues aux courbes de début et de fin de solidification.

On passera d'une solution solide α à une solution solide β dans un intervalle de température représenté exactement par des formes analogues à celles de Roozeboom, permettant de connaître les concentrations à une température déterminée. Entre les deux courbes, on aura présence simultanée des deux solutions solides.

Transformation avec réaction. — Les points de transformation et d'eutexie sont des transformations avec réaction, puisqu'il y a apparition ou disparition d'une phase, alors que naissent deux phases de composition chimique différente.

Dans les transformations à l'état solide, l'eutectique prend le nom *d'eutectoïde.*

Dans les aciers, au point eutectoïde, il y a, au refroidissement, disparition de la solution solide fer γ-carbone au profit des deux phases fer α (fer pur) et combinaison Fe^3 C formant un eutectoïde.

Dans les alliages solides, les transformations sont marquées par des *lignes critiques*, lieu géométrique des *points critiques* des alliages de différentes compositions.

Diagramme d'équilibre. — Les diagrammes d'équilibre des alliages sont ainsi constitués par l'ensemble de toutes ces lignes de transformation, rassemblées sur le même graphique.

Les compositions, portées en abscisses, peuvent être exprimées en poids, atomes ou volumes.

La graduation en atomes permet de définir immédiatement la formule des combinaisons représentées par les maxima des liquidus-solidus; par exemple, si l'on a un maximum pour 60 % atomiques de A, la combinaison est A^3 B^2.

§ 3. Diagrammes d'alliages ternaires. — On peut représenter les transformations d'un alliage ternaire par un diagramme à trois dimensions : on porte alors les compositions sur une représentation

plane triangulaire (fig. 10) : dans le triangle équilatéral A B C, le point M représente l'alliage contenant :

M*a* %	de	métal	A
M*b* %		—	B
M*c* %		—	C.

La somme des trois segments est égale à la hauteur du triangle qui est prise égale à 100.

Perpendiculairement au plan, on porte les températures et l'on

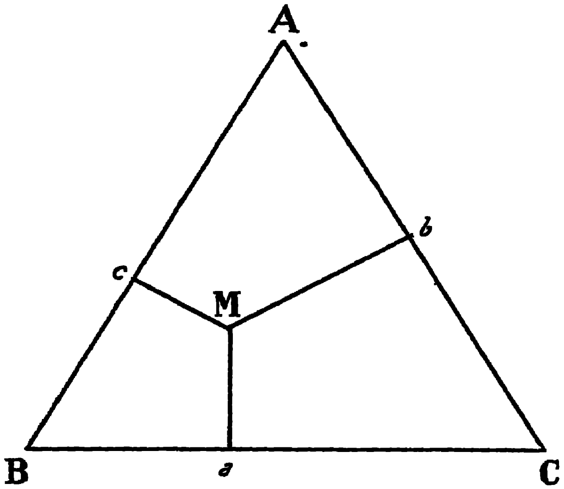


Fig. 10.

obtient ainsi les surfaces de transformation à l'intérieur du prisme droit de base A B C.

Sur les plans verticaux A B, B C, C A, on a les diagrammes plans des trois alliages binaires.

§ 4. Alliages hors d'équilibre. — Si des transformations ou réactions ne se produisent pas, se produisent incomplètement ou se produisent dans des conditions différentes de celles indiquées par le diagramme, on dit que l'alliage est *hors d'équilibre*, soit physico-chimique, soit structural.

Ce sont les résistances passives qui ralentissent ou empêchent le retour à l'état d'équilibre. C'est ainsi qu'on constate des retards à la transformation (hystérésis).

Ces résistances passives diminuent quand la température augmente.

Le refroidissement brusque peut supprimer la transformation en la laissant s'effectuer soit totalement, soit partiellement, à une température plus basse. C'est le phénomène de la *trempe* (martensite des aciers).

La transformation peut, d'ailleurs, ne pas s'opérer dans l'échelle des températures parcourues à la suite d'une certaine vitesse de refroidissement.

On peut ainsi trouver des constituants existant à haute température et maintenus hors d'équilibre à la température ordinaire (austénite des aciers). On a alors une seule phase au lieu de deux phases.

Hétérogénéité des solutions solides. — La phase solide, dans la période de solidification, devrait s'homogénéiser par diffusion pendant le refroidissement dans l'intervalle de solidification. Cette diffusion à l'état solide est tellement lente que la phase solide présente une structure zonée. On a des constituants hors d'équilibre, qui disparaissent par un recuit permettant la diffusion.

Réactions incomplètes par enveloppement. — Pendant la solidification d'un alliage, des cristaux peuvent réagir sur les liquides environnants, donnant naissance à un composé qui enveloppe les cristaux, les sépare du liquide et empêche la réaction.

Les constituants des cristaux sont différents au centre et à la surface.

On a des alliages qui sont ainsi hors d'équilibre, et il est très difficile de rétablir l'équilibre. Il faut un chauffage très prolongé.

Équilibres labiles ou métastables. — A la suite de modifications ou de suppressions des réactions ou transformations, il peut s'établir d'autres lignes du diagramme, représentant un état d'équilibre moins stable, qu'on appelle *état métastable* ou *équilibre labile.*

L'équilibre labile tend à évoluer vers l'équilibre stable.

La diminution des résistances passives par l'élévation de température favorise le retour de l'état labile à l'état stable. On peut d'ailleurs observer la coexistence de constituants, les uns appartenant à l'équilibre stable, les autres à l'équilibre labile (fontes).

§ 5. Utilité et emploi des diagrammes d'équilibre. — Le diagramme constitue le guide le plus sûr dans la plupart des opérations métallurgiques, et permet, par là même, de limiter les essais dans le choix des alliages, de déterminer et de préciser les divers modes de fabrication et les différentes sortes de traitements.

En voici quelques exemples.

Certains *procédés de fabrication*, découverts autrefois par hasard, voient leur mécanisme nettement mis en lumière par la connaissance des diagrammes.

Tel est, par exemple, le « pattinsonnage » qui consiste en un enrichissement du plomb argentifère avant coupellation, et dont le phénomène peut se reproduire pour tout diagramme présentant un eutectique sans solution solide (fig. 8) (au moins d'un côté).

Si, dans ce cas, on fond un certain alliage et qu'on le refroidisse lentement, la rencontre du liquidus marque le début du dépôt à l'état solide de l'un des métaux, pendant que le liquide restant s'enrichit de plus en plus en l'autre métal, sans pouvoir d'ailleurs dépasser le pourcentage correspondant à l'eutectique.

D'une façon analogue, bien qu'un peu plus compliquée, on peut expliquer la marche du procédé Solvay pour la séparation du bicarbonate de sodium à partir du bicarbonate d'ammonium et du chlorure de sodium.

Si l'on considère enfin un diagramme présentant une non-miscibilité totale à l'état liquide, on voit que dans le mélange fondu il y a séparation pratiquement à peu près complète, et cela d'autant mieux que la différence de densité des deux liquides est plus accusée.

La séparation du plomb pour l'affinage du zinc en est une application.

Les *opérations de fonderie* nécessitent la connaissance exacte des points de fusion, afin de ne pas dépenser inutilement du combustible et surtout de ne pas surchauffer l'alliage, ce qui peut avoir des effets désastreux : oxydation partielle, modification de la composition par volatilisation, augmentation des pertes de fusion. Mais si la connaissance du liquidus est importante, celle du solidus ne l'est pas moins. En effet, plus l'écart entre ces deux courbes est grand, plus l'hétérogénéité provenant de la solidification est importante, toutes choses étant égales par ailleurs.

Ainsi l'absolue nécessité d'un recuit pourra-t-elle être lue sur le diagramme lui-même.

De plus, il y a une relation entre l'allure de ces courbes et la liquation, phénomène que nous étudierons à propos de la coulée.

Enfin, s'il existe des lignes de transformation à l'état solide, il pourra être nécessaire de régler les conditions de solidification pour produire directement les constituants stables ou les instables, en raison des propriétés différentes que les uns ou les autres peuvent présenter en vue des traitements et emplois ultérieurs.

Dans les *traitements chimiques*, nous avons la cémentation, diffusion intersolide, susceptible de se produire lorsqu'il existe au-dessous du solidus une solution solide.

Il suffit que les corps soient en contact étroit.

Il n'est pas nécessaire, pour obtenir des alliages, du moins en surface des pièces, que la température dépasse celle correspondant au solidus.

Les *soudures et brasures* utilisent aussi la connaissance des points de fusion et des diffusions.

Les *traitements mécaniques* s'expliquent parfaitement, bien que peut-être moins directement, grâce au diagramme.

Le laminage en particulier exige de la malléabilité, et cette propriété est fonction de la constitution comme le prouvent les règles générales suivantes :

Les alliages formés de deux métaux malléables ou de deux métaux non malléables avec un diagramme ne comportant ni combinaison ni solution solide de combinaison, sont eux-mêmes malléables ou non malléables;

Les alliages formés d'un métal malléable et d'un métal non malléable, avec un diagramme répondant aux mêmes conditions précédentes, sont malléables dans le voisinage du métal malléable et non malléables dans le voisinage du métal non malléable;

En présence d'un eutectique, le passage plus ou moins rapide des alliages malléables à ceux non malléables dépend de la position de l'eutectique et de sa composition.

Toute combinaison est dure et fragile, donc non malléable, ainsi que toute solution solide formée à partir d'une combinaison.

Or on sait que tout maximum du liquidus correspond à une combinaison; de même, tout point de transition implique une combinaison labile voisine.

Il en est de même pour les transformations à l'état solide : l'eu-

tectoïde ferrite-cémentite, par exemple, est assez malléable en raison de sa grande teneur en ferrite.

De ces règles on peut déduire que les alliages binaires laminables ne peuvent correspondre qu'à trois zones de leur diagramme;

Zones de solution solides existant dans le voisinage des métaux purs malléables;

Zones comportant deux phases : l'une étant un constituant malléable, métal ou solution solide, l'autre un eutectoïde ne renfermant pas ou renfermant peu (de par sa position et sa composition) d'élément fragile;

Zones de solution solide malléable à température élevée, pouvant être maintenue par trempe à température ordinaire.

Enfin, les alliages contenant des combinaisons ou des solutions solides dures et fragiles peuvent être intéressants au point de vue frottement et résistance à l'usure.

Quant aux *traitements thermiques*, ils ont le diagramme pour base primordiale.

Au point de vue trempe, le diagramme fixe en effet le minimum de température nécessaire; cette condition nécessaire n'est pas suffisante, car la vitesse de solidification et le temps de chauffage en sont aussi des facteurs essentiels.

Pour le recuit, il ne faut pas trop s'approcher des solidus, de crainte de déformer les pièces et de surchauffer le métal.

Enfin, les revenus doivent être opérés à des températures inférieures à celles de transformation.

TITRE II

LES PROPRIÉTÉS ET LES MÉTHODES D'ESSAIS

CHAPITRE III

LES ESSAIS CHIMIQUES

Nous ne nous étendrons pas sur cette classe des essais chimiques, traitée par ailleurs dans les livres d'analyse chimique.

Cette lacune dans cet ouvrage ne vise pas à diminuer l'importance de cette catégorie d'essais, tout à fait primordiale au contraire; les essais chimiques déterminent la composition proprement dite des alliages.

Les autres essais comportent l'étude des constitutions, des transformations, des caractéristiques mécaniques, et permettent de fixer directement ou de déduire toutes les conséquences pratiques au point de vue des divers emplois et des traitements; et nous voudrions, à ce propos, avant d'entrer dans le propre du sujet, bien insister sur le point suivant : c'est que dans cette étude extrêmement complexe des alliages, il n'est pas un moyen d'investigation qui, à lui seul, permette une compréhension même élémentaire des transformations possibles dans un métal au cours d'un traitement quelconque.

Chaque essai peut apporter un élément plus ou moins important, et c'est de l'ensemble des résultats obtenus que l'on peut enfin extraire des idées suffisamment nettes sur les divers phénomènes métallurgiques.

Il est cependant une sorte d'essais chimiques que nous décrirons ici : celle des essais de corrosion.

Les essais de corrosion.

Les essais de corrosion sont toujours fort délicats, contrairement à ce que l'on pourrait supposer *a priori*.

Ils consistent à exposer des éprouvettes dans des conditions qui reproduisent, autant que possible, celles d'emploi en service.

Technique de l'immersion. — On peut opérer en *immersion totale* dans le milieu d'attaque, mais il faut bien veiller aux erreurs d'interprétation; par exemple, si l'on immerge totalement dans l'eau un alliage ou un revêtement devant résister à l'humidité atmosphérique, on ne reproduit que très faiblement les conditions d'emploi; il faut en plus faire intervenir l'action essentielle de l'air ou de l'oxygène. On peut alors réaliser une *immersion partielle* dans le liquide, et on constate en effet très vite qu'il existe des différences bien nettes d'attaques à l'immersion, à l'affleurement et en dehors du liquide; c'est toujours à l'affleurement que la corrosion est le plus intense. On peut encore faire travailler les éprouvettes en *immersion alternée*, un mécanisme, autant que possible automatique, plongeant totalement les éprouvettes dans le liquide, puis les exposant à l'air, puis les immergeant à nouveau, et ainsi de suite (fig. 11).

Notons que, dans ces immersions, les éprouvettes doivent être suspendues par un fil de lin ou par un crochet de verre, afin de ne réaliser aucun contact galvanique.

Lorsqu'on fait l'immersion dans des bacs, il vaut mieux avoir un bac par éprouvette.

Il faut encore noter le fait suivant : lorsque le bord de l'éprouvette repose sur le fond du bac, l'effet des dépôts du liquide corrosif se fait sentir; il y a, à leur contact, une action corrosive très accélérée; le phénomène est facile à observer avec de l'eau de conduite.

D'autres facteurs à surveiller, eux aussi, très attentivement, sont : la composition et la concentration des réactifs, la variation des concentrations avec le temps, la quantité de réactif, l'agitation ou l'immobilité de ces réactifs, la température, la pression, l'éclairage, la disposition des éprouvettes, leurs formes et leurs dimen-

sions, l'état des métaux ou alliages, l'effet des traitements thermiques, mécaniques, etc... qu'ils ont pu subir, leur plus ou moins

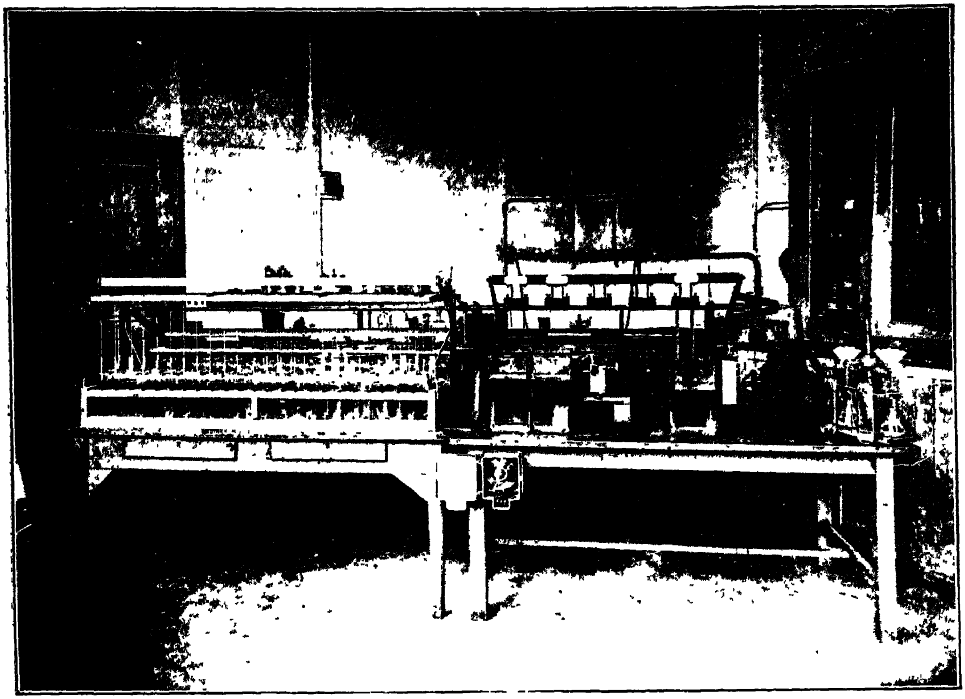


Fig. 11.

Appareil d'essai à immersions alternées du Service des recherches de l'aéronautique.

grande pureté, leur homogénéité, le degré de polissage des surfaces, etc.

Tous ces facteurs ont leur importance et l'on voit là toute cette complexité d'essai.

Activation. — Théoriquement parlant, pour se faire une idée exacte de la tenue en service, il faut évidemment reproduire rigoureusement les conditions d'emploi. Mais on arrive alors à des durées d'essai beaucoup trop longues et l'on est fatalement conduit à jouer sur certains de ces facteurs pour « activer » les expériences.

Naturellement, cela fausse les comparaisons avec le service normal des pièces, et les interprétations deviennent délicates; mais il faut bien s'y résoudre pour gagner du temps.

On peut d'abord forcer les concentrations des milieux d'attaque; ce procédé est spécialement délicat, car la loi vraie de variation de la corrosion en fonction de la concentration n'est jamais régulière et n'obéit à aucune règle déterminée; il faut donc éviter les excès dans ces changements de concentration.

On peut aussi changer périodiquement les milieux de corrosion ou réaliser un renouvellement constant. On peut, en s'exposant aux mêmes critiques que ci-dessus, forcer la température et la pression, additionner aux liquides un peu d'eau oxygénée et aux gaz un peu d'ozone, opérer dans les rayons ultra-violets.

Il existe encore trois autres moyens d'activation plus originaux :

Le premier, très simple, consiste, pour la corrosion atmosphérique, à placer les éprouvettes dans du gazon.

Le second consiste à opérer dans un « brouillard » : pour ce faire, on réalise dans une caisse étanche un véritable brouillard comme milieu de corrosion; la caisse est métallique (fig. 12), ou mieux en

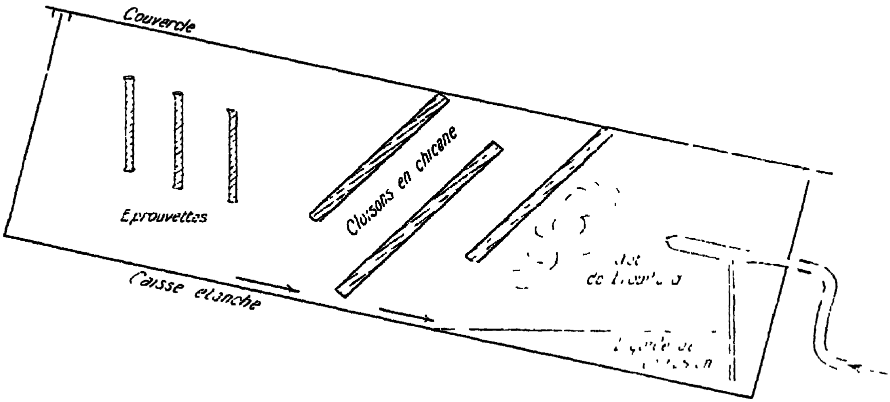


Fig. 12.

Appareil de corrosion « au brouillard ».

bois avec revêtement intérieur laqué ou doublé de plomb; le fond est incliné sur le plan horizontal de façon que le liquide de corrosion se rassemble continuellement dans le dièdre inférieur.

Un pulvérisateur ordinaire est d'une part relié à une canalisation d'air comprimé, d'autre part plongé dans le liquide; il faut avoir soin d'épurer et de laver soigneusement l'air comprimé.

Devant le bec du pulvérisateur, on dispose des cloisons en chi-

cane de façon à obtenir dans la partie opposée de la caisse un espace où le brouillard ne presente qu'une mobilité minime; c'est là que l'on suspend les éprouvettes après avoir ainsi réalisé un milieu bien homogène.

L' « activation » obtenue est considérable.

Les Américains ont en quelque sorte normalisé cet essai. Ils pulvérisent une solution aqueuse à 20 % de chlorure de sodium (*salt spray*) et considèrent qu'une heure d'exposition dans un tel brouillard équivaut à environ trois cents heures de service dans une atmosphère ordinaire.

Un troisième mode d'activation consiste dans l'exposition des éprouvettes dans des chambres où l'on crée des alternances de température, entre — 20° et + 40° par exemple, et ceci plusieurs fois par jour.

Méthodes d'appréciation ou de mesure de la corrosion.

Aspect des éprouvettes. — Il y a d'abord l'aspect des éprouvettes observé périodiquement, les intervalles d'examen devant être faibles, surtout dans les essais de brouillard.

Variation de poids des éprouvettes. — On a ensuite les variations de poids des éprouvettes que l'on peut déterminer périodiquement (1); mais ici une question se pose : il se forme sur les éprouvettes des couches de sels ou des piqûres ou des moisissures : faut-il les enlever avant pesée? C'est généralement ce que l'on fait, mais le grattage n'a rien de précis; il ne faut donc pas effectuer les pesées avec des approximations excessives n'ayant aucun rapport avec les erreurs inhérentes à la méthode.

Ces pesées se traduisent, d'ailleurs, parfois par des gains de poids; et l'on doit encore signaler comme source de perturbation dans le cas des immersions partielles, la différence d'attaque dans les trois régions déjà indiquées.

Dosage des produits dissous ou précipités. — On peut également doser les métaux dissous dans les liquides de corrosion ou tombés

(1) Des essais japonais récents sont basés sur l'emploi d'une balance très sensible, les variations de poids de l'éprouvette étant constamment equilibrées.

au fond des bacs: mais, là encore, il y a de nombreuses sources d'erreur; dans le cas des corrosions vives à l'affleurement, les chutes de ces corrosions dans le bac sont tout à fait irrégulières.

Telles sont les méthodes de mesures usuelles; chacune d'elles est évidemment sujette à caution, mais pratiquement, il est incontestable que l'ensemble de ces examens et déterminations donne une idée assez approchée de la valeur de la corrosion, à condition de suivre les essais de très près, au jour le jour, parfois d'heure en heure (surtout dans les brouillards) et de ne pas accorder aux mesures une précision illusoire.

Il y a ensuite les méthodes de mesure d'allure plus scientifique et que nous ne devons pas négliger.

Mesure des variations thermiques et des dégagements gazeux. — C'est le cas, à l'immersion complète, de la variation de température du bain et du volume du gaz dégagé.

Pour la corrosion de l'aluminium et des alliages légers, par exemple, cette méthode a été largement étudiée avec les solutions chlorhydriques, sodiques et des solutions de chlorure de sodium avec ou sans addition d'eau oxygénée.

Mais, là encore, les critiques sont faciles, et l'interprétation de ces procédés expérimentaux n'est pas immédiate.

Mesure de la force électromotrice de dissolution. — La mesure de la force électromotrice de dissolution constitue une méthode très délicate, étant donnée l'extrême sensibilité des conditions expérimentales et les effets de polarisation.

Mesure de P. H. — Il faut encore citer la méthode des mesures de P. H. On sait que l'étude électrométrique d'une solution permet de chiffrer la concentration d'une certaine catégorie d'ions dans cette solution; on peut, en particulier, appliquer cela aux ions hydrogène, dont la concentration caractérise l'acidité; dans l'eau pure, la conductibilité électrique, très faible, permet d'évaluer à $\frac{1}{10^7}$ la fraction des molécules d'eau dissociées en ions H et OH.; pour faciliter les notations, on dit alors que la teneur en ions hydrogène, ou P. H., est de 7, puissance changée de signe du nombre 10.

On peut, ainsi, dans une étude de corrosion, étudier la variation

du P. H. des réactifs d'attaque. On emploie pour cela deux électrodes à hydrogène, dont l'une renferme du réactif frais, et l'autre du réactif ayant déjà servi. Ces deux électrodes, réunies par une jonction liquide, sont opposées à une pile. On réalise l'équilibre à l'aide de rhéostats, et suivant les indications d'un électromètre capillaire.

La variation du P. H. est mesurée au moyen d'un millivoltmètre.

Essais mécaniques après corrosion. — Les corrosions sur éprouvettes de tôles minces produisent assez rapidement une altération des propriétés mécaniques, et il y a là une méthode indirecte d'appréciation de la corrosion; les essais les plus indiqués sont la traction et surtout l'emboutissage.

Emploi des essais de corrosion pour révéler l'écrouissage. — Nous verrons plus loin que les produits fortement écrouis sont très sensibles aux actions de corrosion (page ?); aussi des immersions violemment corrosives sont-elles employées pour écarter des produits conservant un écrouissage trop accentué; la méthode est surtout utilisée pour les laitons, à l'aide de solution de nitrate mercureux.

Malgré toutes les difficultés du problème dans ces essais de corrosion, il serait souhaitable d'arriver à une *normalisation*; la multiplicité et la sensibilité des facteurs rendent actuellement impossible toute comparaison entre les résultats obtenus par des expérimentateurs différents.

Il semble que se soit plutôt vers la mesure des P. H., vers la chaleur de réaction et peut-être la force électromotrice de dissolution, que l'on doive s'orienter pour une normalisation scientifique; mais ceci exige auparavant une étude extrêmement approfondie de ces méthodes expérimentales.

Dans l'état actuel de la question, si l'on veut se faire une idée des corrosions comparées de divers métaux ou alliages ou de différentes protections, il faut recourir aux essais usuels indiqués plus haut qui, répétons-le, donnent des résultats très suffisants s'ils sont bien conduits; et pour les déterminations très rapides, le procédé du brouillard est spécialement efficace.

Essais chimiques de perméabilité de couches protectrices. — Un essai chimique, touchant encore à la corrosion, consiste dans l'étude

de la perméabilité d'une couche protectrice, métallique ou autre, tendant à protéger un métal de base contre la corrosion.

Un nickelage par exemple, s'il est mal réalisé ou s'il est trop mince, est poreux; il en résulte une altération rapide.

La méthode consiste à appliquer en surface de la pièce un produit chimique, neutre pour le recouvrement lui-même, donnant une réaction visible avec le métal de base, à travers les porosités, s'il y en a.

Le procédé le plus pratique consiste dans l'application d'une feuille de papier imprégnée d'une solution de ferricyanure de potassium : quand le métal de base est un alliage ferreux, on a formation, sur le papier, de taches bleues de ferrocyanure; quand c'est un alliage de cuivre, on a des taches brunes. On lave ensuite l'excès de ferricyanure; les taches restent et constituent un témoin de l'essai; les pièces ne sont pas abîmées.

CHAPITRE IV

LA PYROMÉTRIE

Les températures élevées ont été pendant longtemps estimées à vue, d'après la couleur et l'éclat des radiations lumineuses émises par le four ou l'objet chauffé; ce procédé est basé sur l'échelle lumineuse de Pouillet dont les principaux stades sont les suivants :

Rouge sombre naissant visible	dans l'obscurité . . .	500°
— —	en plein jour . . .	600°
Rouge cerise	. . . .	900°
Jaune	. . . .	1.100°
Blanc	. . . .	1.300°

Souvent les ouvriers se bornent à cette évaluation que l'on doit considérer comme *extrêmement dangereuse.*

L'estimation des nuances varie beaucoup avec l'observateur; avec le mode et l'intensité de l'éclairage extérieur; le procédé amène donc fatalement des erreurs dont l'importance peut entraîner de graves insuccès dans la fabrication (températures insuffisantes ou excessives pour les réactions d'élaboration des métaux ou alliages, pour les traitements thermiques, etc.).

En effet, dans la plupart des cas, l'intervalle optimum de température est bien restreint, les propriétés finales du produit s'écartant rapidement, aussitôt dépassées les limites de cet intervalle, des valeurs reconnues les meilleures pour les diverses utilisations.

Il faut donc, de toute nécessité, *mesurer et non estimer* la température.

La méthode utilisée autrefois pour la mesure des températures élevées était celle des montres fusibles de Séger; ce sont de petites pyramides de 3 à 4 cm de hauteur, faites en des matières fondant à températures fixes, bien déterminées; en faisant varier la com-

position, on constitue ainsi une série de montres représentant une gamme de températures.

Pour porter un four à 965° par exemple, on y place la montre de 960 et celle de 970; lorsque le sommet de la montre à 960 commence à s'incliner, on réduit la chauffe et on reste ainsi dans le voisinage de la bonne température grâce à la « fourchette » indicatrice ainsi réalisée.

Cette méthode n'est plus utilisée que dans quelques rares industries.

Les pyromètres actuels peuvent se classer en cinq catégories : calorimétriques, thermoélectriques, à résistance, à radiations calorifiques, à radiations lumineuses.

§ 1. Pyromètres calorimétriques. — Ce procédé est peu employé; on utilise un témoin en métal que l'on porte à la température à mesurer; puis on place ce témoin dans un calorimètre; la quantité de chaleur mesurée permet de déduire la température initiale du métal.

Le témoin doit être constitué en un métal inoxydable ne présentant pas de points de transformation; on emploie en général le nickel ou le pyros, alliage de nickel et de chrome. Mais cette méthode est longue et exige un opérateur exercé.

§ 2. — Pyromètres thermoélectriques. — Cette méthode dont la mise en pratique est due à M. Henry Le Chatelier, constitue actuellement le procédé le plus courant dans l'industrie pour la mesure des températures élevées.

Principe de la méthode. — Si l'on soude l'un à l'autre, par leurs extrémités, deux fils de métaux différents, et si l'on porte les deux soudures à des températures différentes, on constate que le circuit ainsi constitué est parcouru par un faible courant électrique dont l'intensité est d'autant plus forte que la différence de température des soudures est plus grande.

En intercalant sur le circuit un galvanomètre sensible, maintenant l'une des soudures à température fixe, 0° par exemple, et portant l'autre à diverses températures bien déterminées (données par la fusion ou l'ébullition de substances parfaitement pures), on peut graduer très exactement le galvanomètre directement en températures. Un tel thermo-élément étalonné peut donc servir

à la mesure de la température d'un milieu où l'on aura placé la seconde soudure, dite soudure chaude, l'autre soudure, dite froide, étant toujours maintenue à la même température.

Mise en pratique. — Il y a lieu d'observer dans l'établissement et l'emploi d'un thermo-élément les règles suivantes :

Les métaux et alliages employés doivent être homogènes et rigoureusement exempts d'impuretés;

Ils ne doivent pas subir de transformations aux températures d'utilisation;

Les milieux étudiés pouvant attaquer les fils du couple, il est nécessaire d'établir une protection par un montage approprié;

La soudure froide devra être maintenue autant que possible à la température exacte choisie pour l'étalonnage; s'il y a une petite différence, il faudra faire une correction;

L'intensité thermo-électrique pour une même température est variable d'un couple à l'autre; chacun d'eux doit donc être étalonné spécialement; d'autre part, les précautions prises pour la protection n'étant jamais parfaites, cette intensité varie dans le temps pour un même couple; on devra donc vérifier périodiquement la graduation du galvanomètre.

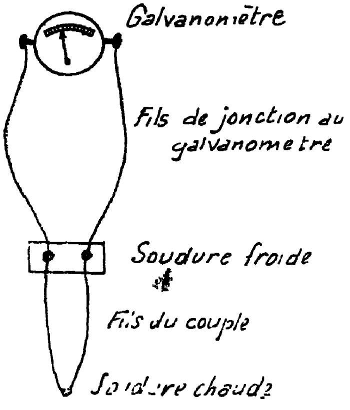


Fig. 13.
Schéma d'un couple thermoélectrique.

Le pyromètre couramment utilisé dans la pratique est constitué de la façon suivante (fig. 13 et 14) : les extrémités opposées à la

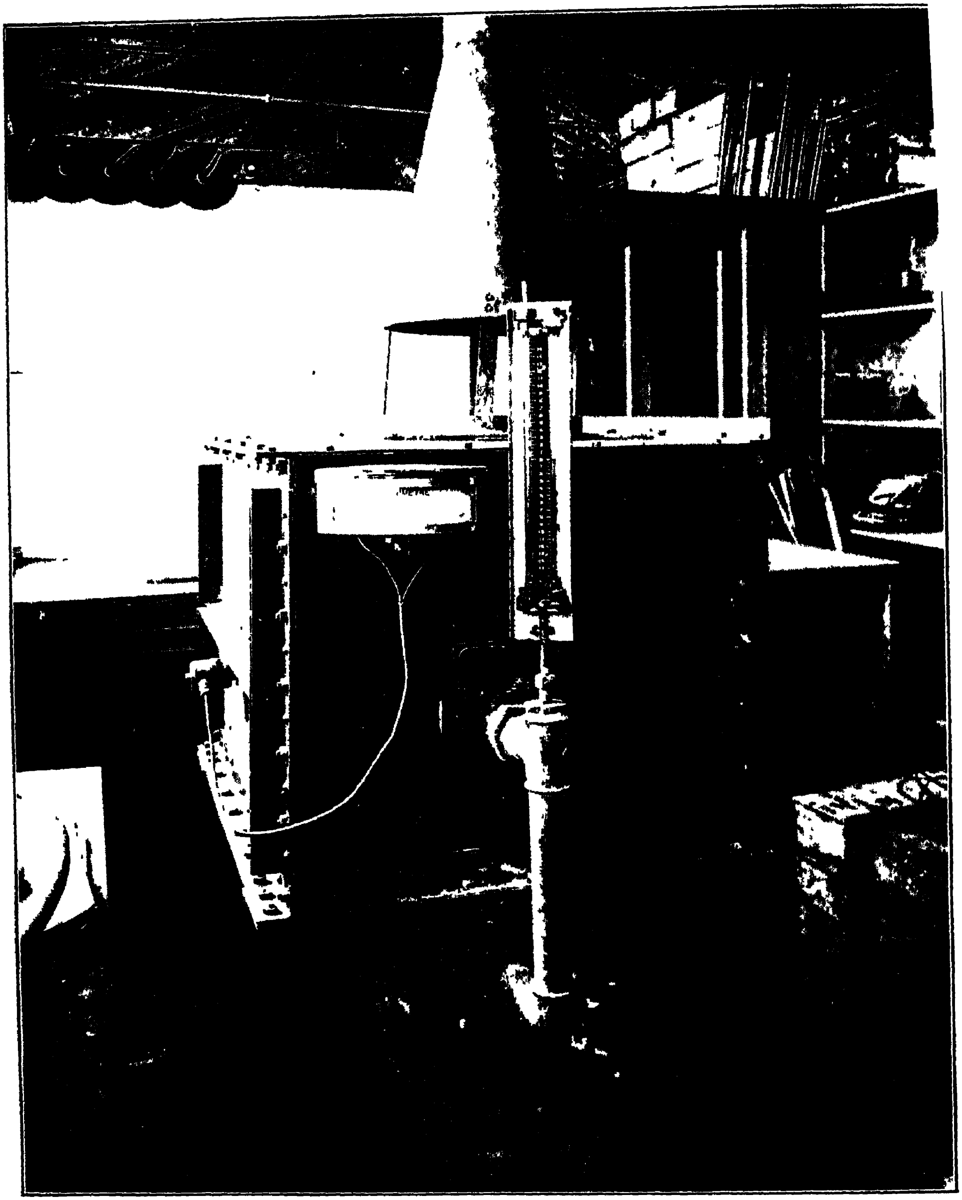


Fig. 14.
Pyromètre thermoélectrique monté sur un four.

soudure chaude des éléments constitutifs du couple sont fixées à deux bornes séparées qui réalisent la soudure froide; ces deux

bornes sont prolongées par deux cordons conducteurs souples, en fil de cuivre, aboutissant au galvanomètre (il faut noter que lorsque l'étalonnage sera fait, on devra toujours employer le couple dans les mêmes conditions, en particulier aves les mêmes cordons souples, sans quoi la résistance du circuit changerait et l'étalonnage ne serait plus valable).

Nature des couples. — Les métaux utilisés industriellement pour constituer les fils de couple sont :

a) *Fer constantan* pour les températures jusqu'à 850° (le constantan est un alliage de cuivre et de nickel à 50 % de cuivre).

Ce couple, d'un très faible prix de revient, a l'avantage de donner une force électromotrice assez élevée (5 millivolts environ pour 100°); on le construit à l'aide de fils de diamètre suffisant, 1^{mm}5 environ, pour que les variations de résistance du couple soient négligeables vis-à-vis de la résistance totale du circuit;

b) *Nickel-nickelchrome*, ou nickelchromes de compositions différentes; pour les températures inférieures à 1.150°, ce couple donne une force électromotrice un peu inférieure à celle du précédent, mais très régulière; il est insensible au recuit pourvu qu'il soit choisi d'une composition bien déterminée;

c) *Platine-platine rhodié* (10 % de rhodium) jusqu'à 1.600°. Ce couple, réalisé en fils de l'ordre de 1/2 mm de diamètre, est fragile. Bien que donnant les forces électromotrices les plus faibles, il est le plus sensible, le plus précis et le moins variable; mais il est naturellement très cher; il faut avoir soin de le protéger avec le plus grand soin contre les gaz des fours, sans quoi il est rapidement mis hors d'usage.

Montage et protection. — Pour opérer le montage, on exécute soigneusement un petit toronage à l'extrémité des fils, et on soude cette ligature soit au chalumeau, soit en faisant jaillir une étincelle électrique.

Pour les couples en métaux communs, on emploie un fondant protecteur comme pour les soudures ordinaires.

Si on casse la soudure pendant usage, il suffit de la refaire comme il vient d'être dit.

Puis on isole les fils du couple en les passant dans de minces tubes de quartz ou de porcelaine ou en les entourant d'un enroulement d'amiante.

Enfin, on place le tout dans une canne protectrice dont la nature est déterminée par celle des gaz ou des matières de contact extérieur, par les vitesses de variations de températures et par la valeur des efforts que la canne peut avoir à supporter : fer, acier traité par l'aluminium, nickel, nickelchrome, porcelaine réfractaire, quartz; interviennent également dans ce choix l'imperméabilité aux gaz et la conductibilité calorifique. Il arrive souvent que l'on protège les cannes d'un prix élevé (porcelaine réfractaire spéciale, quartz) par une autre canne en un produit bon marché que l'on change fréquemment après usure (fer, terre réfractaire, alundum). Pour les couples en métaux communs, on constitue parfois à l'aide d'un des éléments du couple (fer ou nichrome) la canne protectrice elle-même; l'autre élément (constantan ou nickel) est un fil, brasé à l'autogène à l'extrémité du tube; un enroulement d'amiante isole les deux éléments.

Soudure froide et connexions. — Généralement on fixe aux extrémités des fils du couple deux bornes dans lesquelles on engage les fils de cuivre allant au galvanomètre; celui-ci enregistrant la différence de température des soudures chaude et froide, il faut, pour avoir la température du four, ajouter celle de la soudure froide aux valeurs lues au galvanomètre; si cette valeur est 860 et que la température des bornes soit 25°, celle du four est 885°.

Souvent, dans les types de pyromètres vendus dans le commerce, les bornes sont entourées d'une poignée protectrice portant un petit thermomètre indiquant la température de la soudure froide.

Mais si le four rayonne beaucoup de chaleur et que la soudure dite froide ne puisse en être éloignée suffisamment, il arrive que, malgré tous les moyens de protection des bornes contre la chaleur, la température de celles-ci atteint des valeurs assez élevées difficiles à déterminer exactement.

Dans ce cas, le procédé d'addition — procédé approché — précédemment indiqué — n'est plus valable (rigoureusement parlant).

La correction à ajouter à la valeur lue est en effet inférieure à la température de la soudure froide, et ceci d'autant plus que la température de la soudure chaude est plus élevée.

Par exemple, pour les différences 860°-0° et 910°-50°, le galvanomètre ne donne pas la même déviation.

Faisant abstraction de très nombreuses méthodes, toutes criti-

quables, imaginées pour remédier à cet inconvénient, on emploie soit des soudures froides à circulation d'eau, soit des cordons compensateurs.

Les soudures froides à circulation d'eau sont constituées par des boîtes métalliques dans lesquelles plongent deux tubes à essai remplis de mercure.

Les extrémités des fils du couple et des fils du galvanomètre viennent deux à deux dans ces tubes; le mercure réalise la connexion.

Une circulation d'eau dans la boîte maintient constante la température du mercure, température que l'on mesure à l'aide d'un thermomètre et que l'on ajoute à celle du pyromètre.

Ou bien, comme cette température du mercure est sensiblement constante, au lieu de faire partir l'aiguille galvanométrique du zéro de la graduation au moment de la mise en fonctionnement du couple, on la fait partir de cette température de la soudure froide du couple.

Les cordons compensateurs servent à relier les fils du couple au galvanomètre et reportent la soudure froide aux bornes de celui-ci.

Ils sont constitués en alliages bien déterminés et de nature différente, formant un couple qui, dans les limites de température de la connexion fils du couple-cordons (ancienne soudure froide), donne sensiblement la même force électromotrice que le couple lui-même; autrement dit, les cordons ont chacun un pouvoir thermo-électrique nul avec chacun des fils du couple.

Ces cordons peuvent être de même nature que les fils du couple.

Pour les couples platine, platine rhodié, on utilise parfois un cordon en cuivre et un cordon en cupronickel, mais il faut d'une part que les températures des deux connexions soient égales et d'autre part que cette valeur commune soit inférieure à 500°.

La méthode la plus sûre est donc encore celle des soudures à circulation d'eau. Quand la précision peut ne pas être très rigoureuse, on enterre la soudure froide, en connexion ordinaire, assez profondément dans le sol; mais il faut alors des couples longs.

Galvanomètres. — Les galvanomètres sont à pivots ou à suspensions; ceux-ci, plus sensibles, sont en général réservés pour les couples platine-platine rhodié. Ces galvanomètres ont une résistance (de l'ordre de 300 à 400 ohms) environ 100 fois plus grande

que celle du couple, de façon à rendre négligeable, devant la résistance totale du circuit, la variation des résistances des fils du couple avec la température.

Souvent, le galvanomètre est lui-même compensé pour la température par un shunt en acier au nickel.

Certains galvanomètres sont enregistreurs.

L'extrémité de l'aiguille porte une plume se déplaçant au-dessus d'une feuille de papier qui se déroule proportionnellement au temps, à intervalles réguliers.

Toutes les quinze secondes par exemple, un bras métallique vient appuyer sur la plume qui marque un point sur le papier. Un enregistreur continu entraverait le très faible couple moteur du couple.

Les galvanomètres doivent être protégés contre les élévations de température.

Étalonnage. — Deux procédés sont employés :

1° *Étalonnage direct.* — L'étalonnage se fait en utilisant des points d'ébullition ou de fusion bien déterminés, de substances rigoureusement pures; la relation entre la force électromotrice des couples E et la différence de température T des deux soudures, étant de la forme :

$$\log. E = a \log. T + b$$

il suffit de deux ou trois points pour déterminer la courbe des variations; on choisit ces trois points, régulièrement espacés, parmi les suivants :

Ébullition azote liquide.	— 195° 7 à 760 mm
Évaporation CO^2 solide	79°
Glace fondante	*0°*
Ébullition de l'eau	100°
Ébullition de la naphtaline	218°
Ébullition du soufre	444° 5
Fusion de l'étain.	231° 8
Fusion du plomb	*327° 4*
Fusion du zinc.	420°
Fusion de l'Antimoine.	*630°*
Fusion de l'all. Ag = 72, Cu = 28 . .	779°
Fusion du chlorure de sodium.	800°
Fusion de l'argent	*960° 5*
Fusion de l'or	1.063°

Pour les températures d'ébullition, on place la soudure dans la vapeur, en un point voisin de la surface du liquide; il faut avoir soin de protéger contre les pertes de chaleur par rayonnement le vase dans lequel s'opère l'ébullition, ceci au moyen d'une chemise en fils d'amiante par exemple.

Pour les températures de fusion, on protège la soudure par un petit tube en quartz ou en porcelaine réfractaire spéciale.

Les positions d'arrêt du galvanomètre correspondant à ces températures d'ébullition ou de fusion sont soigneusement notées et on établit une courbe d'étalonnage ou de correction.

Pour l'étalonnage à l'aide de métaux précieux, on peut prendre ceux-ci sous forme de fils très fins avec lesquels on réalise un petit enroulement autour de la soudure; on porte celle-ci dans un four chauffé à une température très légèrement supérieure au point de fusion envisagé.

La fusion de l'enroulement détermine un court arrêt du galvanomètre.

2° *Étalonnage par comparaison.* — On dispose d'un pyromètre étalon très sensible, gradué très soigneusement et périodiquement vérifié par la méthode précédente; on dispose d'autre part d'un four électrique à tube où l'on a réalisé une petite enceinte à température bien homogène. On place dans cette enceinte la soudure du couple étalon et les soudures des pyromètres à contrôler, et on opère par comparaison.

Ce procédé est plus rapide que la méthode directe et il est avantageusement employé au laboratoire d'usine pour le contrôle périodique des pyromètres d'ateliers.

Les autres méthodes d'étalonnage du couple sont sujettes à caution.

Par exemple celle du potentiomètre, qui néglige la principale cause d'erreur, la variation de la force électromotrice du couple par suite de l'altération chimique des fils par les gaz des fours.

§ 3. Pyromètres à résistance. — Le pyromètre à résistance est constitué par un petit enroulement en nickel ou en platine, soigneusement protégé par une canne pyrométrique (cette protection a une grosse importance, l'altération du fil entraînant une modification considérable de la résistance), et dont on mesure les variations de résistance avec la température.

La résistance de ces métaux peut etre représentée, en fonction de la température, par une formule à deux termes :

$$R = R_0 (1 + \alpha t + \beta t^2)$$

dans laquelle on a :

pour le nickel : $\alpha = 4 \times 10^{-3}$ $\beta = 0,7 \times 10^{-5}$

pour le platine : $\alpha = \frac{1}{273} = 3,88 \times 10^{-3}$ $\beta = - 0,65 \times 10^{-6}$

Avec le nickel on peut atteindre 100°, avec le platine 1.000°.

La mesure de résistance s'effectue à l'aide d'un pont de Wheastone constitué de trois résistances égales et de la bobine; on enregistre simplement la variation de courant dans le pont galvanométrique au moyen d'un galvanomètre gradué directement en températures. Il faut naturellement une force électromotrice constante; pratiquement les variations de voltage sont compensées par un shunt magnétique.

L'inconvénient de ce pyromètre, en plus d'un prix relativement élevé, est d'être délicat et fragile; d'où une préférence générale pour les pyromètres thermo-électriques, sauf en ce qui concerne les basses températures.

§ 4. — Pyromètres a radiation calorifique. — Cette méthode pyrométrique, la plus utilisée avec la méthode thermo-électrique, est basée sur le principe suivant :

Considérons un corps noir, c'est-à-dire un corps dont le pouvoir émissif est égal au pouvoir absorbant ou, autrement dit, au pouvoir émissif d'une enceinte à température uniforme observée par une petite ouverture pratiquée dans sa paroi; ce corps noir rayonne une quantité d'énergie calorifique W proportionnelle à la quatrième puissance de sa température *absolue* θ :

$$W = K \theta^4$$

c'est la loi de Stéfan Boltzmann.

Si maintenant on reçoit des radiations calorifiques sur un corps

à la température absolue T inférieure à θ, celui-ci recevra une quantité d'énergie W′ donnée par la formule :

$$W' = K(\theta^4 - T^4)$$

cette différence devient très vite pratiquement égale à W, dès que le premier corps dépasse 600°, soit 873° absolus, et le second 100°, soit 373° absolus; on peut donc négliger dans ce cas la température de ce dernier.

Les pyromètres Féry utilisent ce principe : ils concentrent les radiations calorifiques du four au moyen d'une lentille (lunette Féry) ou à l'aide d'un miroir concave (télescope Féry), sur la sou-

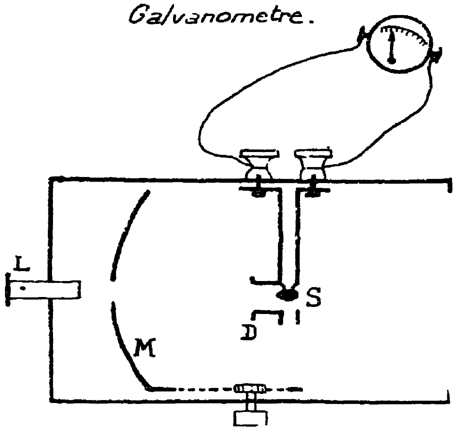


Fig. 15.
Schéma du télescope « Féry ».

dure d'un couple thermo-électrique; les indications du galvanomètre sont proportionnelles à l'échauffement de la soudure, donc à l'énergie rayonnée par le four et à la quatrième puissance de la température.

Le télescope est actuellement le modèle de beaucoup le plus employé, mais seulement pour la mesure des températures supérieures à 400°; il se compose (fig. 15 et 16) d'un miroir M en métal doré et d'une soudure S de couple thermo-électrique : une petite lunette permet d'abord la visée de la région dont on veut avoir la température, et ensuite la mise au point, par déplacement du



Fig. 16.
Télescope « Féry »

miroir parallèlement à son axe, de façon à amener l'image exactement sur la soudure, grâce à un dispositif spécial de réglage. La température de la soudure ne peut dépasser 100°; son échauffement se produit en quelques secondes.

Les indications sont indépendantes de la distance; en effet, d'une part le cône des rayons calorifiques est limité par un diaphragme cylindrique D; l'angle du cône est donc constant et indépendant de la mise au point; d'autre part, l'image du corps chaud, qui déborde de toutes parts la soudure, est d'autant plus grande que l'appareil est plus rapproché du corps, et par conséquent la portion d'image couvrant la soudure correspond à une partie d'autant plus petite du corps chaud.

Enfin, dans certains appareils Féry, on peut amener devant l'ouverture avant du télescope un diaphragme permettant d'arrêter radialement une partie des rayons calorifiques; ce système procure à l'appareil autant de sensibilités que l'on a réglé d'ouvertures du diaphragme, la mesure des plus hautes températures étant obtenue avec la plus petite ouverture; des échelles superposées correspondantes sont tracées sur le galvanomètre.

Étalonnage. — La loi de Stéfan étant très sensiblement suivie, il suffit de déterminer le coefficient K, soit une seule mesure à faire; pour cela, on observe la fusion d'une feuille d'or dans un four à température bien homogène (four à tube de laboratoire par exemple).

§ 5. Pyromètres optiques a radiation lumineuse. — Les pyromètres à radiations lumineuses, ou *pyromètres optiques*, sont basés sur le principe suivant, dû à M. Henry Le Chatelier. Supposons une lunette avec laquelle nous visons le corps dont nous voulons mesurer la température; nous interposons sur le trajet du faisceau (fig. 17 et 18) un élément lumineux dont nous pouvons faire varier l'intensité d'une manière bien déterminée; nous réalisons l'égalité des deux intensités et nous en déduisons la température cherchée.

Pratiquement, l'élément de comparaison est un filament de lampe électrique à incandescence branchée sur un circuit comprenant une pile ou un accumulateur, un rhéostat et un ampèremètre gradué en degrés centigrades. En faisant varier la résistance, on

arrive à réaliser l'égalité d'éclairement, ce qui donne une *dispari tion du filament* sur l'objet visé; on lit alors la température.

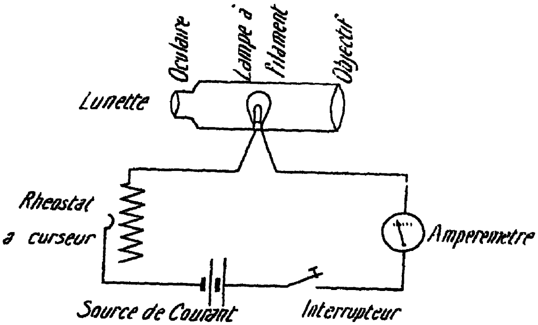


Fig. 17.
Schéma d'un pyromètre optique.

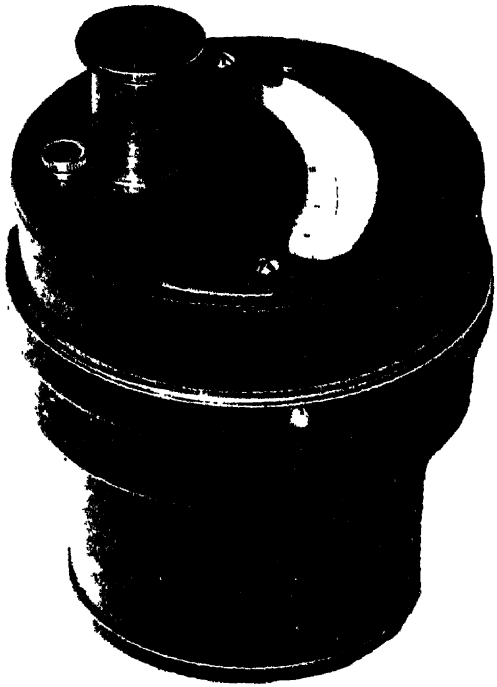


Fig 18.
Pyromètre optique.

Ce type de pyromètre est extrêmement sensible et son emploi est appelé à se généraliser.

§ 6. Installations multiples de pyrométrie. — On s'oriente actuellement de plus en plus vers les installations multiples de pyrométrie permettant le contrôle des températures des fours dans les ateliers industriels : chaque four est muni d'un couple thermo-électrique relié d'une part à un galvanomètre placé près du four, en vue de l'ouvrier chargé de régler le chauffage; d'autre part, tous les couples sont reliés par l'intermédiaire d'un commutateur à plusieurs directions à un galvanomètre placé dans le bureau du chef d'atelier; celui-ci peut donc se rendre compte instantanément des températures de ses fours; un service de signalisation par lampes vient parfois se superposer à cette installation, pour rappeler à l'ordre les ouvriers lorsque cela est nécessaire. On peut également remplacer le galvanomètre du chef d'atelier par un enregistreur, avec commutateur automatique.

§ 7. Régulation automatique de la température. — Enfin,

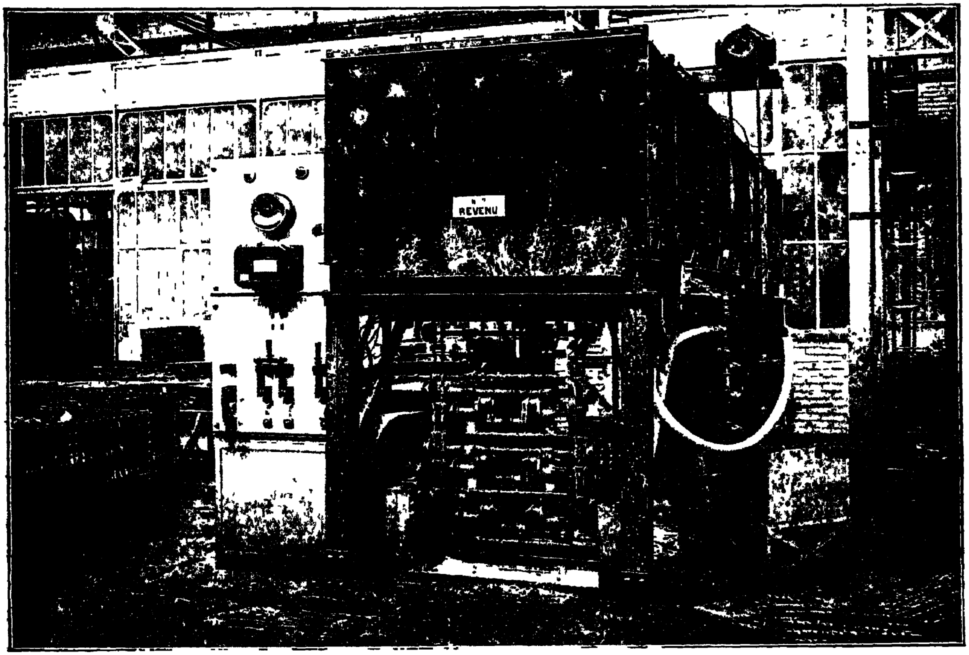


Fig. 19

Four de revenu équipé avec régulateur automatique de température.

depuis ces dernières années, la régulation automatique de la température dans les fours est un fait accompli. Un pyromètre agit sur les organes de régulation de chauffage et maintient automatiquement la température à la valeur fixée à l'avance pour le traitement.

CHAPITRE V

ESSAIS PHYSIQUES

L'un des buts les plus importants des essais physiques est la détermination des diagrammes d'équilibre.

Il suffit d'étudier la variation des divers coefficients en fonction de la température, pour chaque composition de l'alliage envisagé; une brusque variation implique l'existence d'une anomalie, c'est-à-dire d'un point de transformation; le report de ces points, en portant les compositions en abscisses et les températures en ordonnées, permet le tracé des courbes qui constituent le diagramme de l'alliage.

Les propriétés ne sont d'ailleurs pas toutes forcément modifiées par la transformation interne du métal : c'est ainsi que le point de transformation de l'étain est accusé par l'étude de la force électromotrice, celui du zinc par l'essai de résistance électrique...

Les propriétés physico-chimiques et mécaniques peuvent également contribuer à la réalisation du diagramme, mais d'une façon moins directe, comme nous le verrons plus loin.

§ 1. Méthodes calorimétriques. — La méthode calorimétrique consiste dans l'obtention et l'étude des courbes de refroidissement.

Courbes, température temps. — Un corps n'éprouvant pas de transformation dans un certain intervalle de température, et se refroidissant dans une enceinte à température constante, obéit à la formule suivante :

$$\theta = \theta_0 e^{-\frac{K}{c} t}$$

θ étant la différence de température à l'instant t entre le corps et l'enceinte;

θ_0 la valeur de θ pour $t = o$;

c la chaleur spécifique du corps;

k un coefficient constant dans les conditions de l'expérience et dépendant de la nature du corps, de celle de l'enceinte, etc...

La courbe températures-temps est donc une exponentielle; elle peut être obtenue en plaçant un échantillon du corps à étudier dans un four que l'on chauffe à température voulue et qu'on laisse ensuite refroidir à l'air, cet air réalisant l'enceinte à température constante; l'échantillon ayant été préalablement mis en contact avec la soudure d'un couple thermo-électrique, il suffit de noter les températures en fonction du temps.

Ces essais peuvent d'ailleurs aussi bien s'effectuer au chauffage qu'au refroidissement.

Si le corps présente au contraire des transformations, sa chaleur

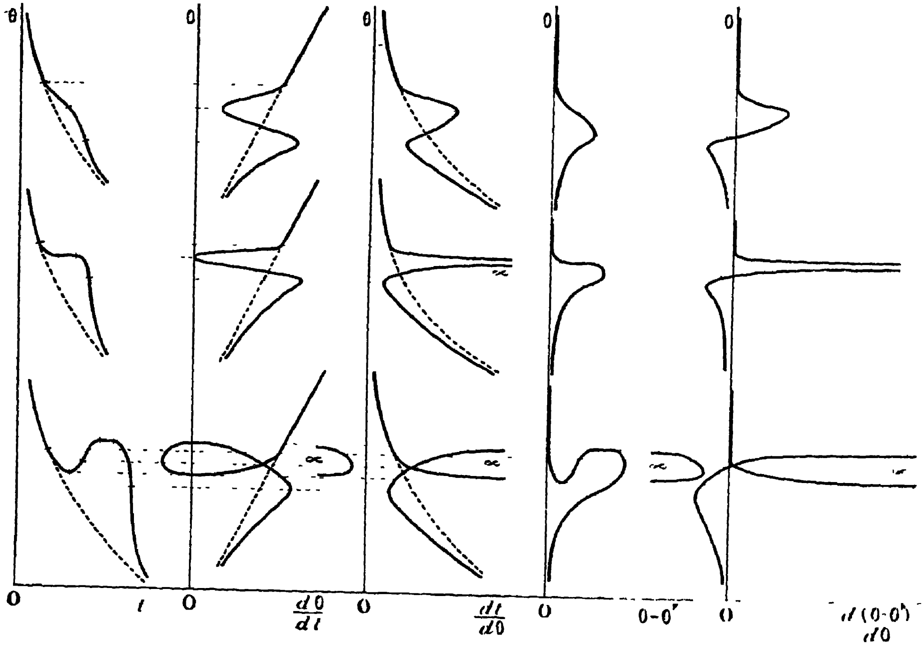


Fig. 20.
Différentes courbes d'analyse thermique.

spécifique vraie subit des variations avec la température, et la courbe températures-temps comporte des anomalies. On opère

comme précédemment; la courbe suit d'abord la loi exponentielle, puis s'en détache au début de la transformation à partir de la fin de l'anomalie, l'échantillon se refroidit suivant une nouvelle loi exponentielle différente de celle du four et asymptotique à elle. Ces anomalies peuvent affecter les trois formes générales figurées dans la 1re colonne de la figure 20 et représenter (de haut en bas) :

1) *une transformation progressive*, caractérisant le dépôt d'une solution solide ou la séparation d'un constituant avant dépôt d'un eutectique; cette anomalie est représentée par un élément hyperbolique théoriquement limité par des points anguleux, l'élément hyperbolique étant à concavité dirigée en sens inverse de celle de la partie exponentielle. Pratiquement les points anguleux sont remplacés par des courbes de raccordement parce que la conductibilité du métal n'est pas infinie et que, la température ne s'homogénéisant pas parfaitement et de façon instantanée dans l'échantillon, la réaction ne se produit pas rigoureusement au même instant dans toute sa masse;

2) *une transformation à température constante*, représentant la solidification d'un corps pur, d'un eutectique ou d'une combinaison, ou enfin l'apparition d'un constituant de transition. On a ici un palier horizontal avec courbes de raccordement :

3) *une transformation avec recalescence* caractéristique d'une transformation retardée; elle se traduit alors par un minimum suivi d'un maximum, ce dernier pouvant être prolongé par un palier, avec courbes de raccordement comme précédemment.

Courbes autres que les courbes températures-temps.

On utilise divers autres procédés expérimentaux permettant d'étudier le refroidissement en fonction des températures et d'une autre coordonnée qui peut être (colonnes suivantes de la figure 20) :

1) *la vitesse de refroidissement* $\frac{d\theta}{dt}$ (méthode de Dejean); — sans transformation on a :

$$\frac{d\theta}{dt} = m\theta.$$

m étant une constante, d'où une droite passant par l'origine;

2) *l'inverse* $\frac{dt}{d\theta}$ *de la vitesse de refroidissement* (méthode d'Osmond); sans transformation, on doit avoir :

$$\frac{dt}{d\theta} = \frac{1}{m\theta}$$

d'où une hyperbole équilatère ayant pour asymptotes les axes de coordonnées;

3) *la différence de température* $\theta - \theta_E$, entre l'échantillon du métal à étudier et un autre échantillon d'un métal ne présentant pas de transformation dans l'intervalle de température considéré (méthode de Roberts Austen).

Le procédé expérimental est le suivant : on place les deux échan-

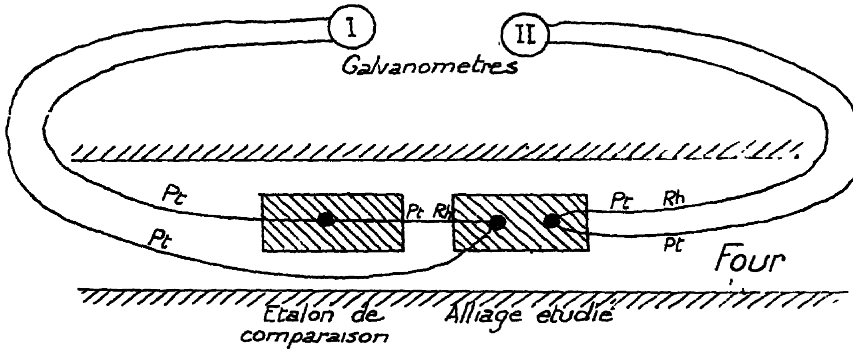


Fig. 21.
Schéma de montage des couples pour l'enregistrement des courbes différentielles de Roberts Austen.

tillons, initialement à la même température, dans une région isotherme du four; un couple ordinaire est introduit dans l'échantillon du métal à étudier et donne les températures (fig. 21); cette différence, lorsqu'il n'y a pas d'anomalie, est nulle et la courbe suit l'axe des ordonnées;

4) *la dérivée* $\frac{d(\theta - \theta_E)}{d\theta}$, par rapport à la température, de la différence de température précédente (méthode de Rosenhain); sans transformation, on a encore l'axe des ordonnées.

Les allures de ces différentes courbes correspondant aux trois genres d'anomalies décrits plus haut sont indiquées figure 20.

A priori, les méthodes les plus séduisantes sont celles d'Osmond et de Rosenhain, les transformations se traduisant chez elles par des pointements beaucoup plus nets que dans les autres; malheureusement elles ne permettent pas un enregistrement continu, ces courbes ne pouvant s'établir que par des séries de mesures discontinues.

On peut laisser passer entre deux lectures des détails intéressants; aussi ces deux méthodes ne sont-elles que très rarement utilisées.

Les trois autres se prêtent à l'enregistrement continu.

La méthode directe, la plus simple, est excellente pour l'étude des transformations à température constante ou avec recalescence; par contre, les transformations progressives peu accusées peuvent passer inaperçues, car on est obligé de limiter la sensibilité du galvanomètre des températures pour respecter les dimensions maxima à donner au diagramme.

La méthode de Dejean est préférable à la précédente, car les pointements sont beaucoup plus prononcés pour les trois modes de transformations.

Mais, en général, dans les cas où le procédé direct n'est pas suffisant, c'est celui de Roberts Austen que l'on emploie, tout au moins pour l'étude des points critiques. Comme on ne recherche ici que les irrégularités de refroidissement, on peut en effet leur laisser prendre des dimensions appréciables, car on n'est plus limité par les dimensions maxima à donner au diagramme, comme dans les méthodes précédentes. On peut donc augmenter sans inconvénient la sensibilité du galvanomètre.

Au contraire, pour l'étude des points de solidification, il n'est pas possible de réaliser un dispositif expérimental répondant aux exigences de cette méthode et comportant un creuset de fusion.

Dispositifs expérimentaux.

L'enregistreur continu étant seul pratique, on a toujours cherché à réaliser des dispositifs répondant à cette condition.

Ces dispositifs peuvent être classés en trois groupes; ils comportent tous, une source lumineuse émettant des rayons qui se réfléchissent sur un ou deux miroirs et tombent finalement sur une plaque photographique.

1) *Appareils comportant un seul miroir à axe de rotation vertical, et une plaque photographique se déplaçant verticalement.*

On a ici un galvanomètre avec miroir à axe de rotation vertical, donnant par conséquent des déviations horizontales correspondant aux changements de température; la plaque se déplace verticalement, dans son plan, d'un mouvement uniforme. C'est le principe du premier appareil construit par Sir Roberts Austen, qui enregistrait ainsi les courbes températures-temps.

MM. Charpy, Coste et Rengade ont modifié l'appareil en remplaçant la plaque mobile par un papier sensible enroulé sur un cylindre de chronographe à axe horizontal; le procédé est couramment utilisé pour la détermination des points de fusion.

2) *Appareils comprenant deux miroirs mobiles, l'un autour d'un axe vertical, l'autre autour d'un axe horizontal.*

C'est la composition de deux mouvements imaginée par Lissajoux; la courbe est enregistrée sur une plaque photographique fixe. Deux types d'appareils répondent à ce principe; dans les deux, le miroir à axe vertical donne les températures. Ce sont :

L'appareil de Wologdine où le miroir à axe horizontal est entraîné par une horloge; on a encore la courbe températures-temps;

Le dilatomètre de M. Le Chatelier, dont nous reparlerons plus loin à propos des essais de dilatation.

3) *Appareils comprenant deux miroirs à axes de rotation verticaux*

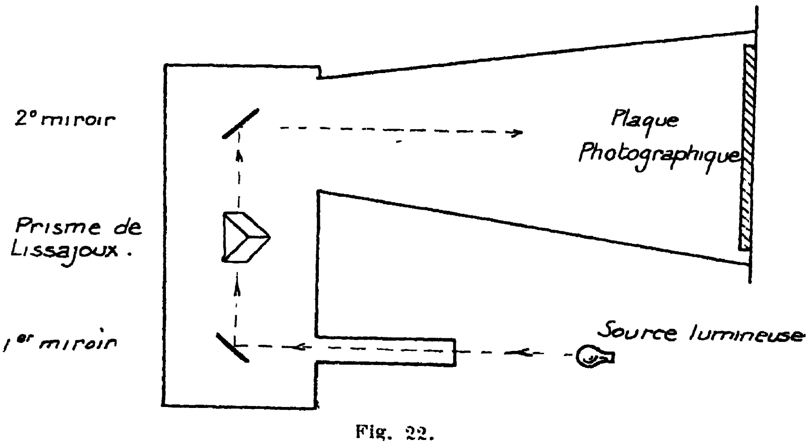


Fig. 22.
Galvanomètre Saladin-Le Chatelier-Broniewsky.

avec passage intermédiaire des rayons lumineux dans un prisme de Lissajoux.

Ce prisme est un prisme rectangle isocele dont les arêtes parallèles sont inclinées à 45° sur l'horizontale; il a la propriété de transformer la déviation d'un rayon lumineux dans le sens horizontal en déviation dans le sens vertical; on reçoit donc encore ici les rayons

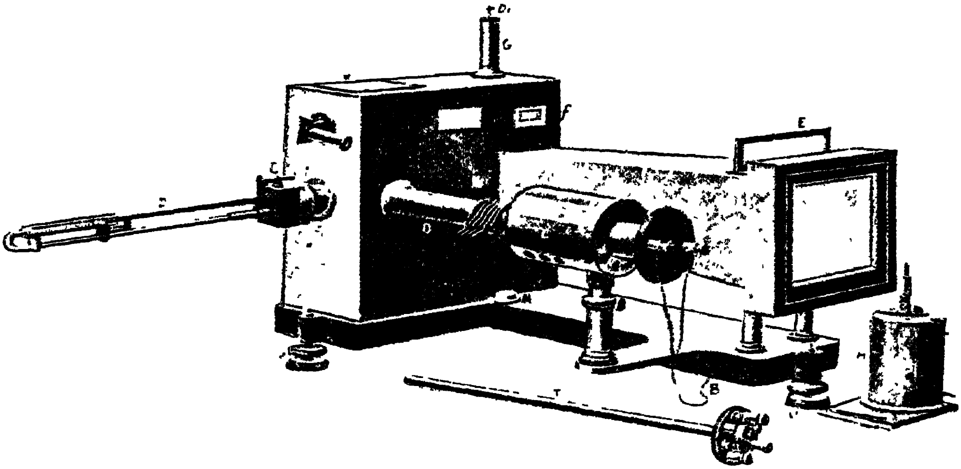


Fig. 23.

Galvanomètre double Le Chatelier-Bronewsky.

L, lampe. — T, canne entourant l'ensemble du couple simple et du couple différentiel. — B, socle de l'appareil. — N, niveau d'eau. — V V', vis calantes. — O, tube d'arrivée des rayons lumineux. — G, h_1, — tête de la suspension d'un galvanomètre. — f, E, lucarne et échelle de lecture directe des températures. — R, plaque photographique. — H, horloge à miroir pour le tracé des courbes températures-temps.

sur une plaque photographique fixe; on a en ordonnées les variations données par le premier miroir, en abscisses celles données par le second.

C'est le dispositif utilisé dans le galvanometre double cree par Saladin et perfectionné par Le Chatelier et Bronewsky (fig. 22 et 23).

Cet appareil permet d'obtenir :

Les courbes temps-températures en montant le premier miroir sur une horloge et le second sur le galvanomètre;

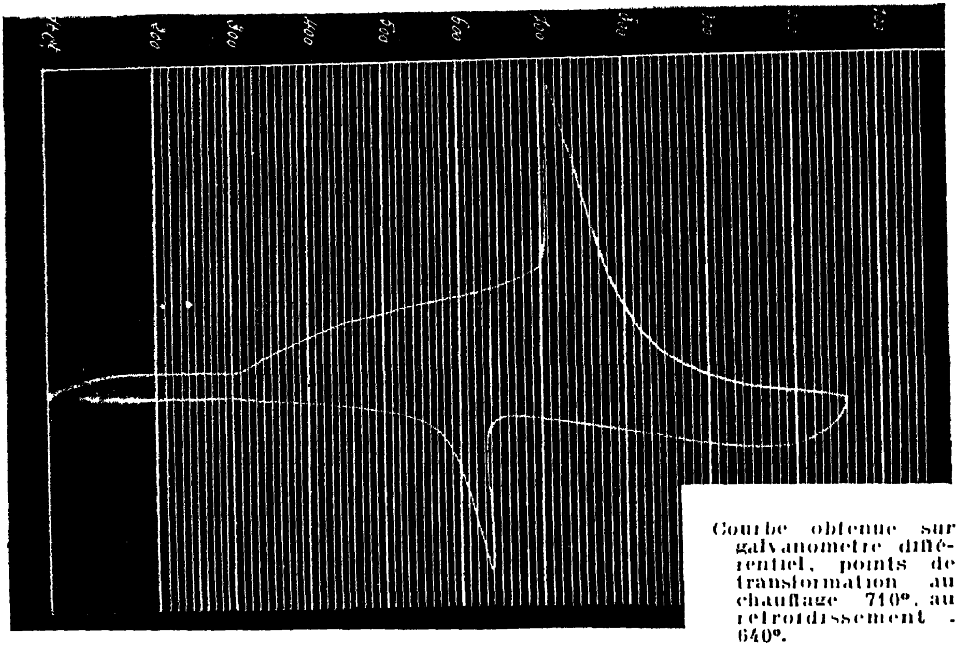
Les courbes de Dejean, en remplaçant l'horloge par un galvanomètre relié à un dispositif de relai d'induction donnant $\frac{d\,\theta}{d\,t}$;

Les courbes de Roberts Austen (fig. 24), en reliant ce dernier galvanomètre au couple différentiel;

Les courbes dilatations-températures suivant un dispositif indiqué plus loin.

L'enregistrement des courbes de Dejean nécessite quelques explications complémentaires.

L'échantillon renferme 2 couples identiques dont l'un est relié



Courbe obtenue sur galvanomètre différentiel, points de transformation au chauffage 710°, au refroidissement 640°.

Fig. 24.

au second galvanomètre et donne les températures θ; le second couple est relié au primaire d'un transformateur dont le secondaire va au premier galvanomètre, les déviations de celui-ci sont proportionnelles à $\frac{d\theta}{dt}$; en effet, la self-induction du circuit primaire est négligeable, et l'intensité du courant traversant ce circuit est proportionnelle à θ; le secondaire étant très résistant vis-à-vis de sa self, le courant qui le parcourt a une intensité proportionnelle à $\frac{d\theta}{dt}$.

Mais cette ingénieuse idée était impossile à réaliser avec un

transformateur ordinaire, en raison des très faibles variations de la force électro-motrice du couple. M. Dejean a donc imaginé un appareil analogue au galvanomètre Desprez-d'Arsonval; mais ici

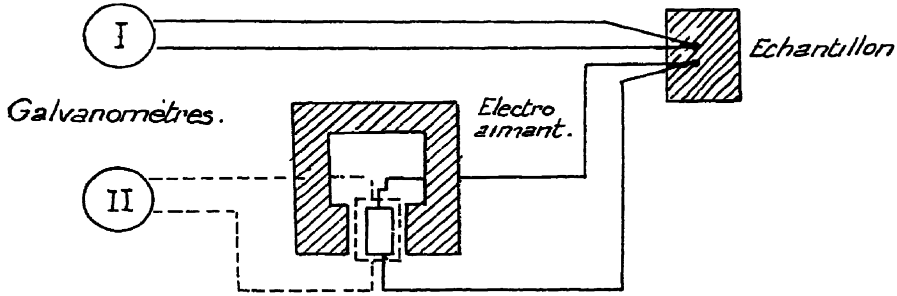


Fig. 25.
Relais d'induction de M. Dejean.

l'aimant permanent est remplacé par un électro-aimant, afin d'augmenter la sensibilité : la bobine mobile dans l'entrefer porte deux enroulements dont l'un est relié au couple et l'autre au galvanomètre à miroir de l'appareil Saladin-Le Chatelier-Broniewsky (fig. 25).

Lorsqu'il passe un courant dans le premier enroulement, il y a

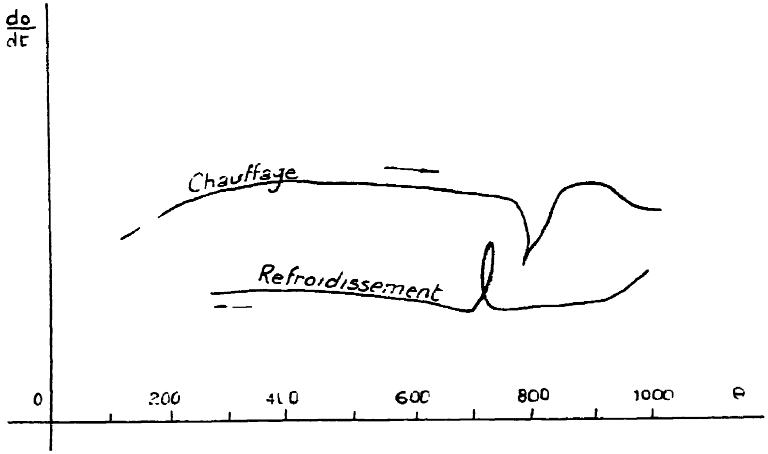


Fig. 26.
Courbes de M. Dejean.

une déviation proportionnelle à l'intensité du courant, donc à θ; la variation pendant un temps $d\,t$, du flux traversant les enroulements, est proportionnelle à $d\,\theta$, et l'intensité du courant dans le

second enroulement sera proportionnelle à cette variation de flux, donc à $\frac{d\theta}{dt}$.

Le type de courbes obtenu est représenté figure 26.

4) Enfin nous devons à M. Chévenard un appareil d'une haute sensibilité qui permet également l'enregistrement des courbes de Roberts Austen et dont nous reparlerons plus loin.

§ 2. — MÉTHODES DILATOMÉTRIQUES. — La méthode dilatométrique, mieux encore que la méthode calorimétrique, apparaît comme l'une des plus sensibles et des plus aptes à faire saisir tous les détails des phénomènes de transformation.

La loi de dilatation des métaux normaux s'exprime généralement d'une manière simple en fonction de la température; le plus souvent, une formule à deux termes est applicable dans un large intervalle. On dispose ainsi d'un critérium sensible et précis pour révéler les plus faibles singularités des courbes expérimentales et les rattacher à des changements d'état.

La transformation allotropique du fer et des aciers s'accompagne d'une importante variation de leur volume spécifique; la courbe de la dilatation accusera par ses fluctuations les différents stades de cette transformation dont l'allure revêt, avec certains aciers, une forme des plus compliquées. D'autre part, la sensibilité des indications reste à peu près la même, que la variation de température soit lente ou rapide; *cette propriété confère à la méthode dilatométrique un avantage essentiel sur les méthodes calorimétriques* : elle permet d'étudier entre des limites très étendues l'influence de la vitesse sur le mécanisme des transformations.

Les changements d'état anormaux, ceux des corps ferromagnétiques en particulier, influencent aussi la dilatation.

L'effet, quelquefois notable, le plus souvent minime, peut toujours être discerné par l'emploi d'un dispositif convenable.

Dispositifs expérimentaux.

L'appareil que nous avons signalé dans la deuxième catégorie des appareils cités plus haut est dû à M. Henry Le Chatelier, le miroir à axe horizontal est mû par l'extrémité d'une tige du métal à étudier, on a ainsi la courbe dilatation-température.

Dans la troisième catégorie, on a un dispositif absolument analogue qui se place sur le côté de l'appareil Saladin, Le Chatelier, Broniewsky (fig. 23 — dispositif D C).

Enfin, nous avons l'appareil suivant, très sensible et très perfectionné :

Dilatomètre différentiel enregistreur de M. Pierre Chévenard.

Principe de l'appareil. — Deux échantillons, l'un du métal à étudier, l'autre d'un alliage étalon sans transformation, transmettent leurs dilatations au mécanisme d'enregistrement; celui-ci se compose d'une petite plaque en forme de triangle rectangle, portant un miroir; l'un des sommets correspondant à l'angle le plus aigu de ce triangle, coulisse dans une rainure parallèle au plan du triangle; les dilatations sont transmises perpendiculairement à ce plan, celle de l'alliage étalon au sommet de l'angle droit, celle du métal à étudier au troisième sommet; un rayon lumineux après s'être réfléchi sur le miroir va frapper une plaque photographique fixe.

Les anomalies de ce métal sont donc mises en évidence par les différences de dilatation entre ce métal et l'alliage étalon qui, lui, présente une courbe régulière.

Les courbes obtenues ont comme ordonnées ces différences de dilatation, et comme abscisses les températures fournies par la dilatation de l'étalon; c'est en quelque sorte la méthode de Roberts Austen appliquée à la dilatation.

Description de l'appareil. — Le schéma de l'appareil est représenté figure 27.

Les tubes T^1 et T^2 plongent dans un four électrique à résistance; ils renferment les éprouvettes dont les dilatations sont transmises par des tiges de silice t^1 et t^2, les ressorts R^1 et R^2 maintiennent le contact entre ces tiges et les éprouvettes; le miroir M est porté par la plaque triangulaire P^1, P^2, P^3; P^3 coulisse dans une rainure ρ; P^1, en contact avec le poussoir c^1, reçoit les dilatations de l'étalon, P^2, en contact avec c^2, les dilatations du métal à étudier; le miroir est maintenu en contact avec ρ c^1 c^2 par le ressort r.

Enfin, un dispositif à horloge permet d'inscrire de petits tirets à côté de la courbe, à des intervalles de temps égaux.

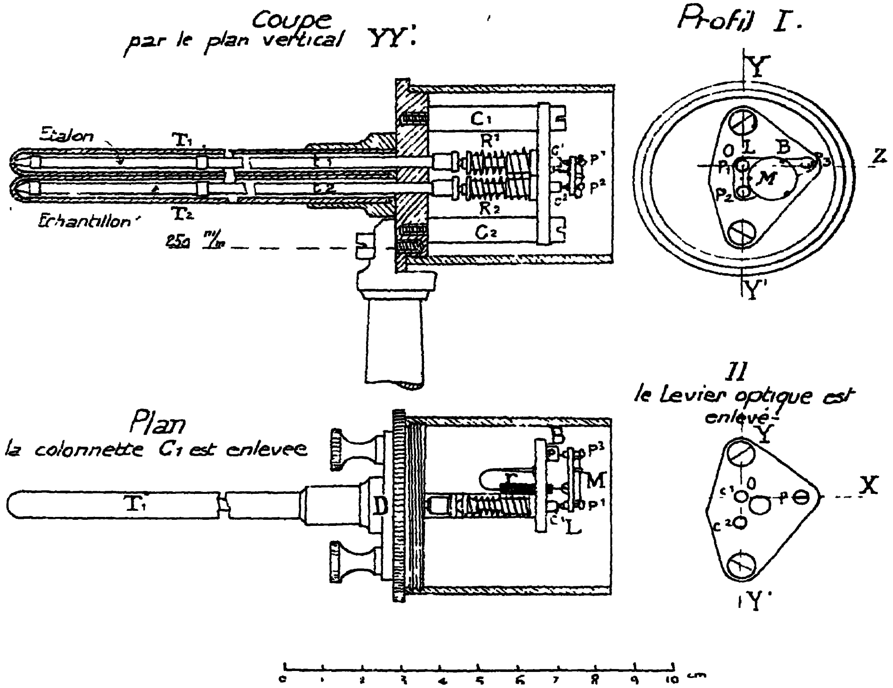


Fig. 27.
Dilatomètre differentiel enregistreur de M. Chévenard.

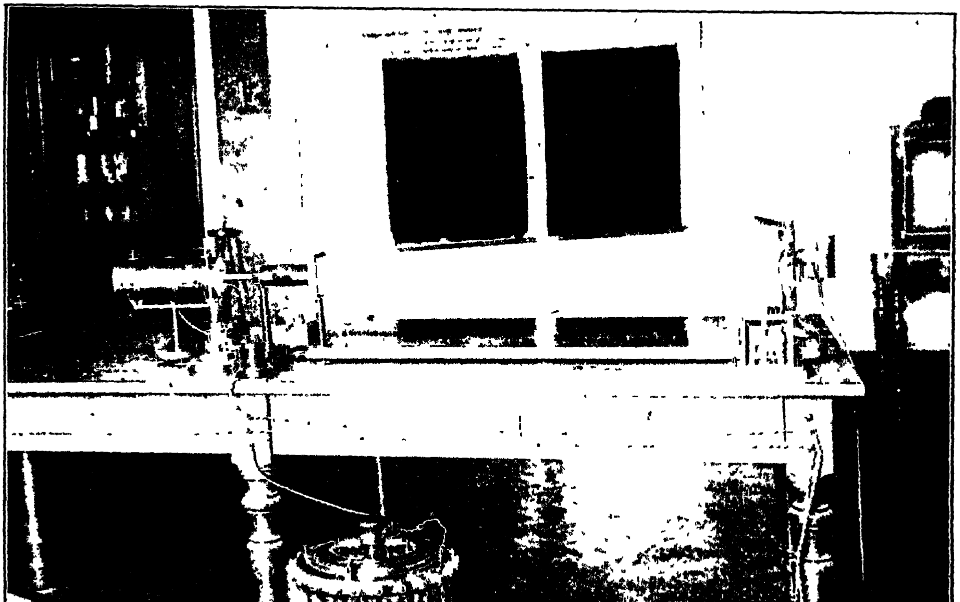


Fig. 28.

L'étalon est en métal « baros », alliage de nickel et de chrome à 10 % de chrome; sa loi de dilatation est réversible et très sensiblement voisine de la dilatation linéaire.

Les figures 29 et 30 représentent des courbes obtenues avec un même acier nickel-chrome pour des vitesses différentes de refroi-

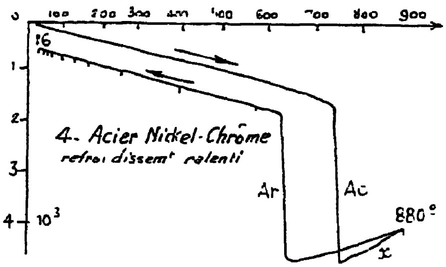


Fig. 29.

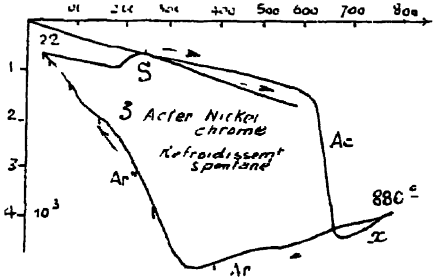


Fig. 30.

Courbes obtenues avec le dilatomètre « Chévenard ».

dissement. La première courbe indique un point de transformation au refroidissement entre 600 et 700 degrés; dans la seconde courbe, ce dernier point s'est dédoublé, le premier, d'intensité faible, se trouvant vers 550 à 600°, le second, très marqué, vers 400°.

M. Chévenard a réalisé récemment un type modifié de cet appareil dans lequel la courbe est enregistrée graphiquement au lieu de l'être photographiquement.

Analyseur thermique industriel de M. Chévenard.

Le principe est le suivant : une éprouvette de l'alliage à étudier renferme une aiguille d'un métal étalon, le *pyros*, alliage complexe à base de nickel et de chrome; les dilatations de l'éprouvette et de l'aiguille sont enregistrées graphiquement par l'intermédiaire d'un système amplificateur à leviers; la première, Δ, donne la courbe dilatations-temps; la seconde, θ, la courbe température-temps, de l'alliage envisagé.

Description de l'appareil (fig. 31). — L'échantillon E et l'aiguille A, renfermés dans le tube de chauffe T d'un four électrique, sont prolongés par des tiges de silice t^1 et t^2; un premier système de

leviers L^1 et L^2, puis un second système λ^1 et λ^2 amplifient les dilatations; des plumes inscrivent les courbes sur un cylindre de chronographe C.

Le pyros est un alliage voisin du baros, possédant sur ce dernier la propriété d'être sensiblement plus rigide aux températures élevées.

Cet appareil, simple et robuste, possède une sensibilité élevée grâce au tracé de la courbe dilatations-temps.

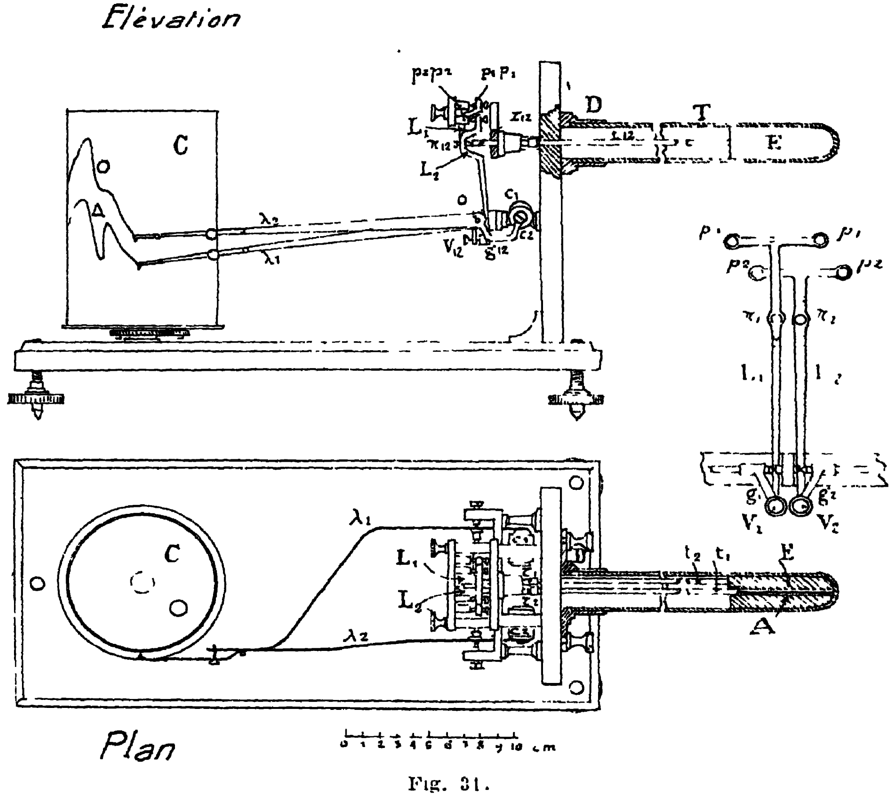


Fig. 31.
Analyseur thermique industriel Chévenard.

En effet, malgré sa régularité, le diagramme température-temps seul ne mettrait pas en évidence avec une netteté suffisante les phénomènes critiques qui s'effectuent vers la fin du refroidissement ou pour des vitesses de chauffe ou de refroidissement un peu grandes.

Nous avons vu que l'intensité de la variation de volume au cours

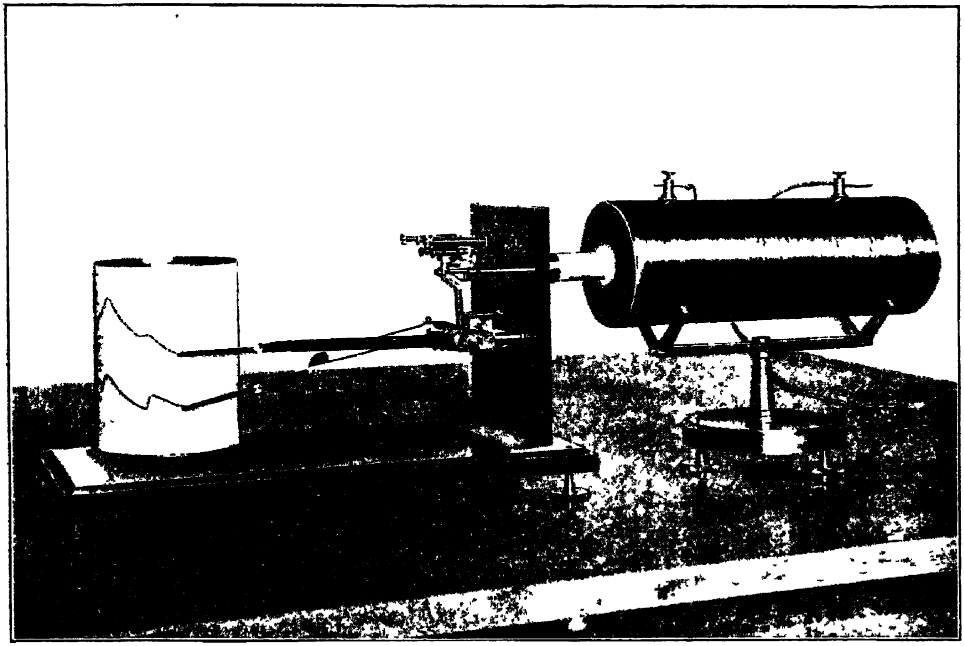


Fig. 32.

des transformations, est au contraire sensiblement indépendante de la température et de la rapidité de ses variations.

En particulier, dans le cas des aciers, de quelques alliages de

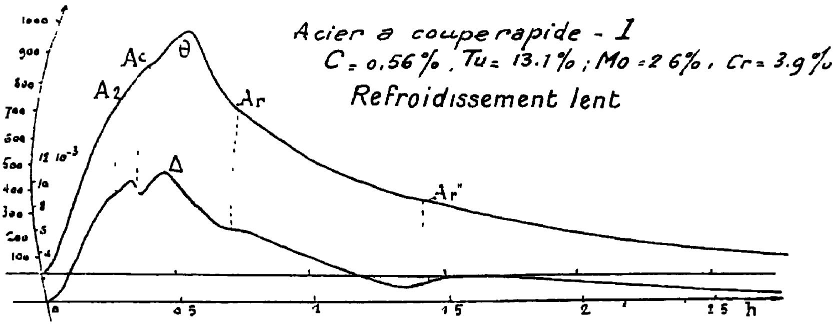


Fig. 33.

cuivre, de certaines variétés de silice, etc..., où l'amplitude de ce

changement de volume est considérable, tout phénomène critique sera caractérisé par un crochet apparent de la courbe température-temps.

Ces avantages permettent d'envisager des applications très étendues.

Les figures 33 et 33 *bis* relatives à un acier rapide mettent bien en évidence les points de transformation dans le cas de refroidissement ralenti (deux points peu accusés) et de refroidissement spontané (un seul point plus accusé à basse température).

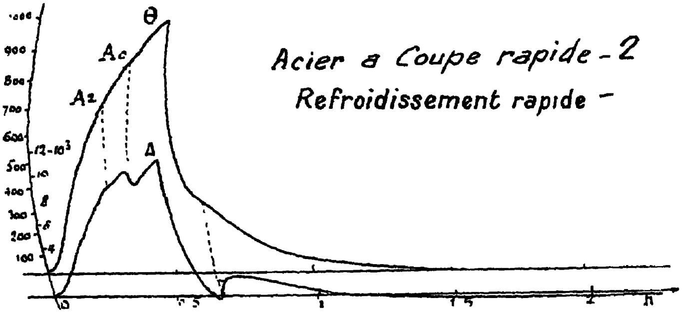


Fig. 33 *bis*.
Courbes obtenues avec l'analyseur Chévenard.

M. Chévenard a également construit un *pyromètre différentiel* qui enregistre les courbes de Roberts Austen, et tient des deux derniers appareils : il comporte un double tube de chauffe, chaque tube étant, ainsi que son contenu, analogue à celui de l'analyseur ; le reste de l'appareil est analogue au dilatomètre différentiel ; l'un des tubes de chauffe renferme un échantillon constitué par le métal de comparaison, l'autre par le métal à étudier ; les dilatations des deux aiguilles pyrométriques sont seules transmises au support triangulaire du miroir.

§ 3. Essais physiques autres que la fusibilité et la dilatation. — Il existe beaucoup d'autres essais physiques parmi lesquels nous retiendrons les essais de résistance électrique, de magnétisme, de thermo-électricité, de diffusion par les rayons X, et de radio-métallographie, les essais au son et les essais de sablage.

Résistance électrique.

Les essais de résistance et de conductibilité électriques peuvent avoir une grosse importance pour certaines industries de constructions électriques; de plus, si l'on étudie la variation de la conductibilité en fonction de la composition, on obtient des résultats très nets au point de vue vérification de l'existence de solutions solides et détermination des composés définis; l'étude en fonction de la température donne des variations très rapides à la traversée des points de transformation; cette méthode d'essais fournit donc un excellent moyen de vérification du diagramme d'équilibre.

Principe de la méthode. — Il s'agit dans cette étude de mesurer de très faibles résistances (échantillons de métal, sections d'induits

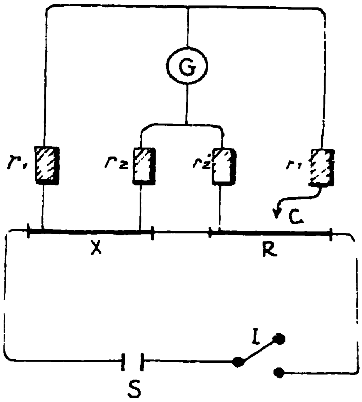


Fig. 34.
Schéma d'un pont double de Thomson

de dynamos, joints de rails, etc...), le pont de Wheastone ne peut être employé, car les résistances des contacts et des conducteurs ne sont plus négligeables par rapport aux résistances mesurées. Pour s'affranchir de cet inconvénient, il est nécessaire d'employer le pont double de Thomson dont le principe est le suivant : un circuit (fig. 34) est constitué par une source de courant S, un interrupteur I, une résistance de comparaison graduée R, et la résistance à mesurer X; une dérivation est établie aux bornes de X, une autre sur une partie de R, cette dernière limitée par un

curseur de contact C, comme l'indique la figure; les deux courants dérivés agissent en sens inverse sur un galvanomètre de zéro G; des résistances r^1, r^2, r'^1, r'^2, sont placées sur les branches de dérivation; tout en maintenant l'égalité des rapports $\frac{r^1}{r'^1}$ et $\frac{r^2}{r'^2}$ on modifie ces quatre résistances formant ainsi branches de proportion, et on déplace le curseur jusqu'à ce que le galvanomètre revienne au zéro; si r mesure la résistance de la portion de R intéressant la dérivation, on a très sensiblement :

$$X = r \frac{r^1}{r^2}$$

d'où l'on déduit facilement la résistivité.

Pour faciliter le maniement de l'appareil, on établit en général un dispositif réalisant automatiquement l'égalité de proportion des résistances r^1, etc..., et permettant par la manœuvre d'une seule manette d'obtenir les rapports : 100/1, 10/1, 1/1, 1/10, 1/100.

M. Chévenard a également construit un galvanopyromètre qui permet l'enregistrement automatique des courbes : résistivités-températures, ainsi d'ailleurs que des courbes : aimantation-température et pouvoir thermo-électrique-température, propriétés que nous allons étudier dans les paragraphes qui suivent.

L'étude de la conductibilité à température constante par variation de composition permet de préciser les zones de diagrammes, car les courbes obtenues ont des allures nettement différentes suivant que l'on a une solution solide, une miscibilité partielle ou une miscibilité nulle.

Une remarque fort intéressante est la suivante : les courbes de conductibilité présentent toujours des pointements extrêmement accusés pour les métaux purs et les combinaisons. Ces pointements correspondent à des maxima de conductibilité. Comme les combinaisons sont toujours fragiles et ne se prêtent pas au forgeage ni au tréfilage, on peut en conclure que les hautes conductibilités pour conducteurs électriques devront être recherchées dans le voisinage immédiat des métaux purs.

La présence, même très faible, d'impuretés provoque toujours une chute rapide de la conductibilité.

On doit noter également que les variations de conductibilité

thermique sont souvent parallèles à celles de la conductibilité électrique.

Magnétisme.

Le magnétisme constitue une propriété très importante pour certaines fabrications, à savoir : la construction des aimants permanents, des noyaux de circuits, des tôles de dynamos. Une étude approfondie de l'influence de la composition et des traitements sur les divers coefficients magnétiques des alliages utilisés est indispensable.

Cette propriété est aussi mise à profit industriellement pour la vérification de certaines pièces métalliques et la recherche des défauts, fissures, soufflures, etc...

Enfin, au point de vue théorique, son intérêt est considérable; le magnétisme donne parfois des résultats que ne fournit aucune autre méthode; son étude extraordinairement complexe, encore bien loin d'être élucidée, est à coup sûr une source féconde de fructueuses recherches.

Pour déterminer les coefficients magnétiques des métaux, on opère en général de la façon suivante :

Un solénoïde est relié à une source électrique; un second enroulement, de quelques spires, lui est superposé, et se ferme sur un galvanomètre balistique.

Quand on fait passer un courant dans le solénoïde, il se produit un flux magnétique φ que l'on peut mesurer par la déviation du galvanomètre balistique; si on recommence l'opération en plaçant dans le solénoïde un noyau du métal à étudier, on a une nouvelle valeur Φ du flux; le rapport de cette seconde valeur à la première représente la perméabilité μ du métal dans les conditions de l'expérience; on en déduit facilement les autres coefficients qui sont, le champ H, quotient du flux φ par la section S du solénoïde, l'induction B quotient de Φ par S, et l'intensité d'aimantation I donnée par la formule :

$$I = \frac{1}{4\pi}(B - H).$$

Les variations de ces coefficients sont influencées par un grand nombre de facteurs dont quelques-uns sont encore peu étudiés.

Le magnétisme est employé, pour le contrôle des soudures d'alliages ferreux, grâce à une adaptation due à M. Roux.

Le procédé est basé sur le principe suivant : si l'on place de la

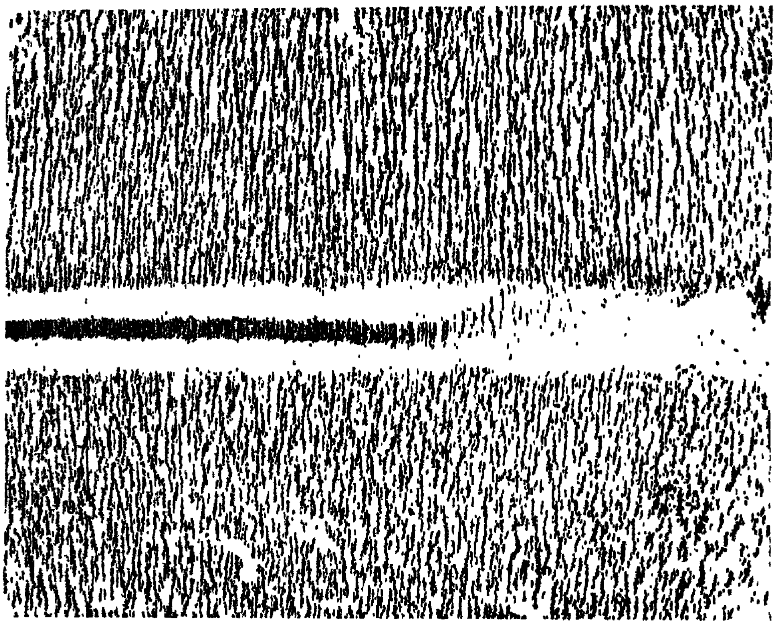


Fig. 35 *a*.



Fig. 35 *b*.

limaille de fer dans un champ magnétique, les particules métalliques se rassembleront aux endroits où le passage du flux est le

plus difficile, de façon à y diminuer la réluctance; si l'on met cette limaille au voisinage immédiat d'une soudure, elle s'accumulera sur les régions présentant une insuffisance de perméabilité magnétique correspondant à des parties défectueuses de la soudure.

Le dispositif est réalisé par un électro-aimant dont les pôles sont appliqués de part et d'autre de la ligne de soudure; on interpose une feuille de papier entre la pièce et l'électro-aimant et l'on projette sur elle la limaille, à l'aide d'un pulvérisateur spécial; les photographies 35 *a* à *c* montrent ce qu'on obtient : la figure 35 *a*

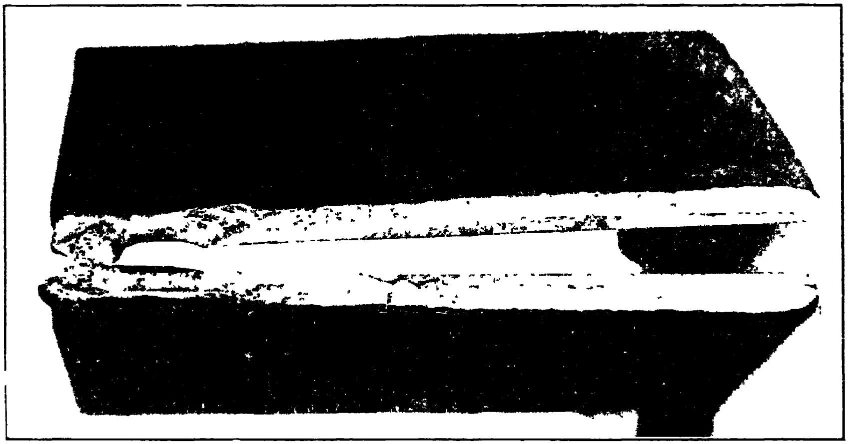


Fig. 35 a.

montre la répartition de limaille; une bande centrale très dense correspond à une fissure caractérisée, mise en évidence sur la radiographie 35 *b* et sur la soudure ouverte 35 *c*.

Thermo-électricité.

La thermo-électricité est appelée à devenir une méthode de contrôle d'atelier, elle a été spécialement étudiée par M. Galibourg; elle est déjà employée pour séparer des pièces en acier demi-dur de pièces d'acier moins carburé à faible pourcentage en nickel; les essais de dureté ne donnent rien parce que les empreintes sont sensiblement égales; par la thermo-électricité, au contraire, on arrive à établir la distinction avec netteté, et rapidité.

Il suffit de réaliser un couple en plongeant la pièce dans un bain de mercure constituant la soudure chaude et de mesurer la f. e. m. produite; on trouve des valeurs très différentes suivant la nature de la pièce et suivant son traitement.

Étude aux rayons X de la structure cristalline.

La structure cristalline des alliages constituant en quelque sorte un réseau et réalisant de ce fait une diffraction des rayons X, on peut baser sur ce principe une étude cristallographique des alliages. Mais ceci est encore du domaine du laboratoire et n'est pas entré dans la pratique industrielle.

Radiométallographie.

Les récents perfectionnements apportés dans la construction des tubes à rayons X et dans la fabrication des appareils producteurs de courant à haute tension, ont rendu possible l'application des rayons X à l'examen de l'homogénéité des pièces.

On arrive maintenant à obtenir des radiographies de pièces d'acier dont l'épaisseur peut aller jusqu'à 10 centimètres. Grâce à des appareils appropriés, le procédé d'exploration par les rayons X est devenu très simple et il est appliqué industriellement. On peut ainsi déceler dans l'intérieur du métal les criques, soufflures, hétérogénéités, ainsi que les fissures ou cavités des soudures.

Essais au son.

Ils révèlent les tapures. Trois caractéristiques du son : hauteur, timbre et durée.

On choisit la durée, qui n'exige aucune éducation musicale de la part de l'opérateur.

Les pièces qui rendent un son court ou mat sont examinées avec soin dans le but de rechercher les tapures.

Essais de sablage.

Très précieux pour mettre en évidence les tapures, en particulier pour les pièces trouvées suspectes par l'essai au son.

Technique de l'opération. — Laisser séjourner les pièces dans le pétrole pendant une ou deux heures, de manière à ce que le liquide pénètre par capillarité dans toutes les fissures éventuelles. On sable ensuite aussitôt après cette opération; en examinant les pièces, on voit se dessiner sur la surface mate et dépolie les fissures, par suite du ressuage du pétrole. On facilite ce phénomène en ébranlant les pièces par chocs au marteau.

CHAPITRE IV

ESSAIS PHYSICO-CHIMIQUES

Les méthodes physico-chimiques sont au nombre de deux : la *métallographie microscopique* ou *micrographie*, et la *macrographie*.

Elles consistent toutes deux en un examen d'une surface polie et attaquée, d'un échantillon d'alliage ou d'une pièce. La micrographie permet de déceler, à l'aide du microscope, les cristaux infiniment petits du métal, et leurs aspects particuliers; la macrographie, n'exigeant en général qu'un examen à l'œil nu, met en évidence l'hétérogénéité possible du métal, ainsi que l'organisation générale cristalline et l'influence sur cette organisation des traitements mécaniques à chaud ou à froid.

Ces deux méthodes précisent donc, par l'image, l'effet des divers traitements sur la structure du métal, la micrographie illustrant en plus l'idée d'ensemble que l'on avait retirée de l'étude des zones de diagramme. En un mot, elles font *comprendre* les phénomènes dus aux traitements, ou dont l'existence avait été indiquée par les autres essais; elles se rattachent donc par là même et très étroitement à toutes les méthodes de recherches.

Au point de vue industriel, elles sont tout à fait précieuses, dans la grande majorité des cas; utilisées par un personnel expérimenté, elles permettent, d'un coup d'œil, de contrôler la nature et la constitution d'un alliage, d'apprécier l'efficacité d'un traitement, de reconnaître les causes d'un accident. Les résultats obtenus ont déjà donné à ces méthodes rapides et sûres une place prépondérante dans tous les laboratoires d'usines actuels.

§ I. Métallographie microscopique. — La métallographie microscopique est donc basée sur l'observation au microscope, et ceci sous des grossissements pouvant aller jusqu'à 2.000 diamètres.

L'échantillon, convenablement prélevé, est poli, de façon à ne présenter aucune raie susceptible de gêner l'observation; puis il est, en général, attaqué par un réactif qui différencie les diverses phases; après lavage et séchage il est examiné et enfin, s'il y a lieu, photographié.

Avant d'étudier séparément ces stades, nous allons passer rapidement en revue les divers genres de renseignements auxquels conduit la micrographie.

Tout d'abord, l'*hétérogénéité chimique*, provenant de la présence d'inclusions solides ou gazeuses (souvent invisibles sous de faibles grossissements), ou encore des conditions de solidification (grand intervalle de température entre liquidus et solidus, ségrégation) pouvant nécessiter un recuit.

La *constitution chimique;* chaque constituant apparaissant sous des formes caractéristiques et des colorations particulières après attaque; d'où détermination de cette constitution par comparaison avec des micrographies issues d'études antérieures.

La *composition chimique;* évaluation possible d'après les dimenmensions respectives des éléments (carbone des aciers ordinaires, cuivre pour certains laitons et certains bronzes, graphite dans les fontes, plomb dans les bronzes, etc.), et application de la theorie du titre fictif dans les alliages spéciaux.

Ces observations initiales permettent alors de préciser les *traitements antérieurs : mécaniques*, d'après la grosseur, la forme et l'orientation des cristaux des diverses phases (répartition en bandes de certains constituants, signe de fragilité; division extrême des constituants, accusant un écrouissage par travail à froid, etc.); *thermiques*, décelés par la grosseur des cristaux, le rassemblement en masses des phases, la présence de certains constituants caractéristiques des trempes et revenus; *chimiques*, d'après l'existence des constituants particuliers sous des formes caractéristiques (cémentation, soudure, brasure, recouvrement).

De ces résultats d'examen se déduisent directement les propriétés, en particulier les propriétés mécaniques des produits étudiés.

Si ces propriétés ne conviennent pas pour les pièces à fabriquer, on cherchera les moyens d'y remédier par des traitements appropriés.

On pourra enfin contrôler progressivement l'effet de ces traitements et en établir les conditions optima.

Par exemple, la coalescence des constituants, immédiatement visible, est une preuve de grande fragilité: on y remédie par un traitement thermique effectué à une température et pendant un temps que l'on déterminera d'après les recherches scientifiques antérieures, et que l'on contrôlera rigoureusement. Les trempes complètes ou partielles seront facilement différenciées et leur destruction progressive par revenu, très exactement suivie.

Enfin, les accidents de fabrication donnent encore à la micrographie une raison d'être primordiale : l'étude des carburations ou décarburations locales ou inopinées, des liquations, de la surchauffe, de la coalescence, des traitements thermiques erronés, doit avoir pour base le passage au microscope.

A. *Prélèvement des échantillons.* — Le prélèvement de l'échantillon doit être fait avec le plus grand soin.

Tout d'abord, suivant les circonstances, l'endroit du prélèvement dans une pièce métallique peut ne pas être indifférent; il est souvent utile à ce sujet de faire intervenir d'autres méthodes, en particulier la macrographie qui donne l'aspect général de la structure et indique les hétérogénéités; on peut aussi être appelé à tenir compte du sens des traitements mécaniques antérieurs, pour découper la surface d'examen de l'échantillon suivant un plan passant par une certaine direction.

Le mode de prélèvement varie avec les métaux ou alliages; si le produit est très fragile (fontes, bronzes, ferro-alliages, etc.), on le casse au mouton et on choisit une surface à peu près plane parmi les morceaux; dans le cas contraire, on découpe l'échantillon à la scie, ou bien on l'isole à l'aide d'une meule en carborundum très étroite.

Il faut prendre garde, au cours du prélèvement, de ne pas échauffer le métal; des modifications pourraient en effet en résulter, et les examens ultérieurs seraient naturellement faussés.

Lorsque l'échantillon est de petites dimensions, il est commode de le fixer dans un bâti métallique (morceau de tube par exemple avec vis de serrage) afin de pouvoir le manipuler plus aisément et avoir une base plus large pour la réalisation de la face d'examen, qui risquerait sans cela de ne pas être rigoureusement plane.

Enfin, quand on ne possède que des éléments très petits du métal à étudier (grains, fils, copeaux), on les noie dans de la gomme

laque ou du mastic d'opticien, le tout étant contenu dans un morceau de tube métallique.

B. *Polissage.* — Il comprend trois phases : meulage, dégrossissage et finissage.

a) *Meulage.* — Le meulage a pour but de créer ou parfaire la

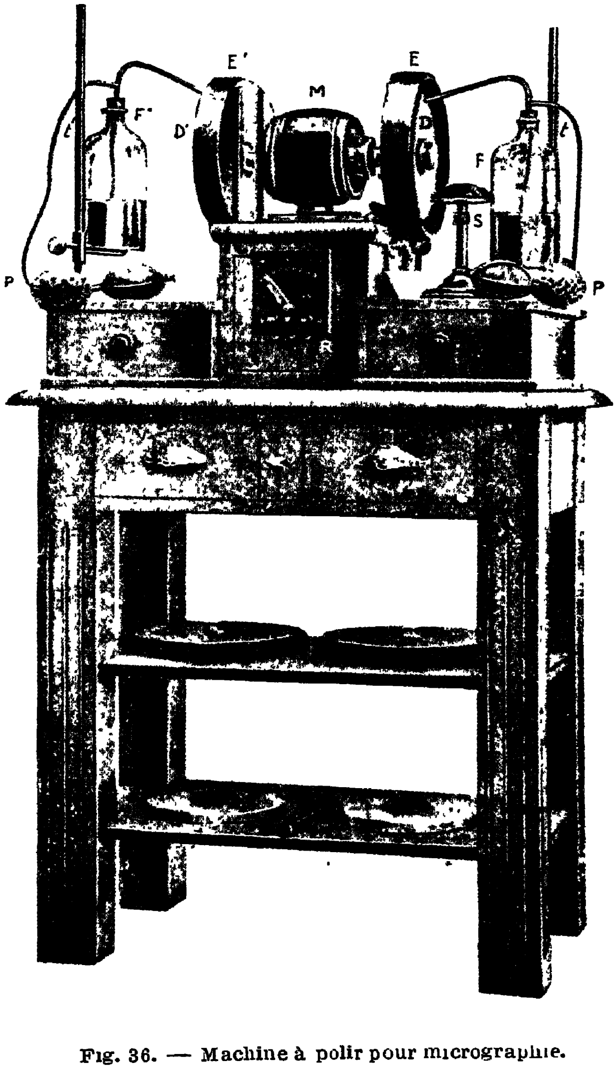


Fig. 36. — Machine à polir pour micrographie.

D D' = Meules de polissage; M = Moteur; R = Rhéostat; E E' = Carters des meule
F F' = Flacons pulvérisateurs avec tiges supports *t t'* et poires P P'; S = Appuie-main.

surface plane d'examen; il se pratique généralement sur la joue d'un disque de carborundum entraîné par un moteur électrique (vitesse : environ 1.600 tours à la minute); il faut éviter tout échauffement à l'aide d'un arrosage copieux.

b) *Dégrossissage.* — Cette seconde phase, la plus longue, permet d'arriver peu à peu à une surface sillonnée seulement de rayures très fines, très faciles à éliminer dans la dernière opération du finissage; on frotte pour cela l'échantillon, à la main, sur des papiers émeris et potées de grains très réguliers et de grosseurs décroissantes, ces papiers étant placés sur des dalles ou des plaques rigoureusement planes; on a soin de maintenir l'échantillon bien parallèle à lui-même sur chacun des papiers; après chaque papier on lave l'échantillon pour que des grains d'abrasif ne passent pas d'un papier sur un autre plus fin; on prend également la précaution de croiser les raies à angle droit à chaque changement de papier, de façon à faire disparaître les raies de l'abrasif précédent par un polissage sensiblement perpendiculaire. C'est là la phase la plus délicate; d'elle dépend en grande partie le dressage parfait de l'échantillon. Les papiers les plus généralement utilisés sont les suivants : papiers émeris 00 et 0000; papiers potées 00 et 0000.

c) *Finissage.* — La dernière opération est un polissage sur meules de cuir ou de drap sur lesquelles on pulvérise de l'alumine, spécialement préparée, en suspension dans l'eau : on utilise d'habitude deux meules verticales calées aux extrémités de l'arbre horizontal d'un petit moteur électrique tournant à 1.600 ou 1.800 tours (fig. 36); ces meules sont en bois recouvert d'une lame de zinc, puis de cuir ou de feutre comprimé pour l'une des meules; de drap pour l'autre; des flacons pulvérisateurs projettent sur ces meules l'alumine en suspension, dont on choisit la grosseur suivant les métaux à polir; l'alumine la plus grosse est pulvérisée sur la première meule, la plus fine sur la meule de drap; il faut avoir soin naturellement de laver l'échantillon entre les deux meulages.

Quelques indications sont nécessaires à propos de la préparation des alumines, qui doit être faite avec le plus grand soin.

On trouve dans le commerce de l'alumine spécialement calcinée et broyée pour polissages micrographiques; on la met en suspension dans l'eau distillée à raison de 15 gr par litre; on agite et on laisse déposer dix minutes; les grains les plus gros, qui se trouvent alors dans le fond du récipient, sont inutilisables pour le moment; on

siphonne donc pour isoler cette grosse alumine qui sera broyée au mortier et remise en suspension par la suite avec de l'alumine fraîche; le liquide siphonné est laissé lui-même au repos pendant quatre heures, au bout desquelles on siphonnera de nouveau; l'alumine déposée est dite alumine de dix minutes; celle encore en suspension, alumine de quatre heures; on met en suspension, on étend ces deux alumines de façon à faire avec chacune d'elles environ 4 litres de liquide de polissage; l'alumine de dix minutes sert au finissage des métaux durs; celle de quatre heures, après passage à l'alumine de dix minutes, au finissage des métaux mous.

Il faut naturellement avoir un disque de polissage et un flacon pulvérisateur par grosseur d'alumine; ces disques doivent être nettoyés fréquemment, par lavage sous l'eau courante et brossage; on termine par un lavage à l'eau distillée. Lorsque la machine ne sert pas, les disques de polissage sont enfermés dans un carter de tôle; la machine à polir doit d'ailleurs être placée dans un petit local spécial, à l'abri absolu des poussières.

Toutes ces opérations de polissage, exécutées par un ouvrier expérimenté ne doivent pas durer plus d'un quart d'heure pour un échantillon normal de 1 cm² de section. On obtient ainsi un poli parfait, semblable à un nickelage.

Quand le polissage est terminé, il ne faut plus toucher la surface d'examen avec une matière quelconque; le séchage doit se faire uniquement à l'air comprimé, après lavage à l'eau distillée ou à l'éther. Il faut éviter que l'air comprimé tienne en suspension des poussières ou des gouttelettes d'huile provenant du ventilateur; s'il en était ainsi, il faudrait placer avant l'ajutage de séchage un filtre d'ouate comprimée.

Le polissage des métaux mous (aluminium, magnésium et leurs alliages) est très difficile, car il n'est pas aisé de faire partir les dernières stries.

La question a été étudiée par MM. Lecœuvre et Cazaud aux Laboratoires du Service technique et industriel de l'Aéronautique : voici les résultats auxquels il sont parvenus.

Le polissage doit être commencé sur papiers émeris et potées, mais ces papiers doivent être préalablement paraffinés afin de retenir les grains d'abrasif; puis les échantillons sont frottés à la main sur un drap enduit d'un produit de polissage de cuivres (il en existe de nombreux types dans le commerce); cette opération

a pour but de faire disparaître, par dissolution acide, les traces d'écrouissage superficiel provoqué par les polissages antérieurs; ensuite, polissage prolongé sur une meule de drap fin tournant à 2.000 tours environ avec, comme abrasif, de l'alumine d'une heure; cette dernière opération doit durer une dizaine de minutes; l'alumine est préférable à la magnésie souvent conseillée. Si l'on emploie la magnésie, pour qu'il n'y ait pas carbonisation, il est avantageux de la mettre avec le doigt sur la meule et de pulvériser de l'eau distillée bouillie.

C. *Attaque.* — Il arrive que la structure est totalement ou partiellement décelée par le polissage lui-même, sans qu'il soit nécessaire d'avoir recours à une attaque chimique; les constituants mous se creusent en effet, laissant en relief les parties dures; c'est ainsi que l'on examine très bien, par simple polissage, les antifrictions, l'oxydule dans le cuivre, les scories dans le fer puddlé, etc... Mais ces cas sont rares et il faut, en général, opérer une attaque chimique, au moyen de réactifs spéciaux, d'ailleurs fort nombreux; ces réactifs agissent de différentes façons : les uns dissolvent certains constituants en leur faisant perdre leur poli tandis que les autres restent inattaqués; ou bien ils produisent des colorations superficielles différenciant les constituants; ou enfin le réactif dépose un métal à la surface de certains constituants.

La plupart de ces réactifs doivent être employés à froid; quelques-uns au contraire exigent une certaine température comme il est indiqué ci-après. On opère l'attaque dans des verres de montre, tout au moins pour les réactifs employés à froid.

Il est bien difficile de donner des indications sur la durée de l'attaque; l'opérateur doit surveiller la marche de l'opération; si l'attaque est jugée insuffisante après l'examen au microscope, on la reprend de nouveau.

Les réactifs les plus connus sont les suivants :

1° *Pour la plupart des métaux et alliages.* — Solutions étendues d'acide chlorhydrique à 22° Baumé.

a) Dans l'eau distillée (0,5 %);

b) Dans l'alcool éthylique (1 %).

2° *Pour les aciers.* — *c*) Solution à 4 % d'acide picrique pur dans l'alcool éthylique;

d) Réactif de Benedicks : solution à 4 % d'acide métanitrobenzolsulfonique dans l'alcool éthylique;

e) Solution à 4 % d'acide azotique pur dans l'alcool éthylique;

f) Solution à 1 % d'acide sulfurique dans l'eau distillée.

Toutes ces solutions acides s'emploient à froid; les plus utilisées sont les deux premières, la solution *c*) pour mettre plus spécialement en évidence l'*austénite*, la solution *d*) la *martensite* et en général les constituants fins.

Le réactif au picrate de sodium, à employer à *chaud*, est également très fréquent; il permet de distinguer la *cémentite* de la ferrite, inattaquées par les réactifs précédents (la cémentite est ici colorée en noir, la ferrite restant inattaquée). On prépare ce réactif avant usage, à l'aide des deux produits suivants :

g') Solution à 2 % d'acide picrique dans l'eau distillée;

g'') Soude à 36° Baumé;

On fait chauffer 4 parties de *g'*) et on ajoute progressivement 1 partie de *g''*).

Pour mettre en évidence la *troostite*, on utilise le réactif de Kourbatoff, formé également de 2 éléments (1 partie du premier pour 3 du second) :

h') Solution à 4 % d'acide nitrique pur dans l'anhydride acétique;

h'') Mélange par parties égales des alcools méthylique, éthylique et isoamylique;

Ce réactif après sept minutes d'attaque ne colore que la troostite.

Pour déceler nettement dans la *ferrite* la différence d'orientation des grains et les figures de corrosion, on peut attaquer successivement l'acier par les deux réactifs suivants :

i') Solution à 12 % de chlorure double de cuivre et d'ammonium dans l'eau distillée (réactif de Heyn);

i'') Solution à 10 % d'acide azotique pur dans l'eau distillée.

Enfin, pour révéler les *carbures* des aciers spéciaux, on emploie la solution *g*) de picrate de soude à *chaud* ou l'un des trois réactifs suivants :

j) Solution d'acide chromique (2 gr) et d'acide sulfurique à 66° Baumé (25 cm²) à employer *à chaud;*

k) Eau régale plus ou moins glycérinée suivant le degré d'attaque désiré;

l) Réactif de Yatsevitch :
Solution de soude à 10 % : 20 cc;
Eau oxygénée à 3 % : 10 cc.

3° *Pour les alliages de cuivre :*

m) Solution alcoolique de perchlorure de fer :
Alcool à 95° : 750 cc;
Acide chlorhydrique à 22° Baumé : 250 cc;
Perchlorure de fer : 34 gr.

n) Oxyde de cuivre ammoniacal (obtenu en précipitant par l'ammoniaque une dissolution de sel de cuivre, et ajoutant un léger excès d'ammoniaque jusqu'à disparition du précipité);

o) Solution à 50 % de soude à 36° Baumé dans l'eau distillée, à employer à *chaud* après addition de quelques gouttes d'eau oxygénée;

p) Attaque électrolytique par solution aqueuse d'acide citrique (100 gr par litre) ou de molybdate d'ammonium.

Ou encore l'une des deux solutions acides suivantes de perchlorure de fer, la première lorsque la teneur en cuivre est élevée, de 75 à 100 %, la seconde lorsqu'elle est seulement moyenne : de 55 à 75 %.

q) Eau distillée : 100 cc;
Acide chlorhydrique à 22° Baumé : 50 cc;
Perchlorure de fer : 5 gr.

r) Eau distillée : 100 cc;
Acide chlorhydrique à 22° Baumé : 6 cc;
Perchlorure de fer : 19 gr.

Pour les bronzes, on peut également utiliser avantageusement la solution *g*) de picrate de soude (à chaud).

4° *Pour les alliages d'aluminium :*

s) Solution à 50 % de potasse à 36° Baumé dans l'eau distillée après addition de quelques gouttes d'eau oxygénée;

t) Solution à 12 % d'acide fluorhydrique chimiquement pur, dans l'eau distillée.

Au cours de ces attaques, la face polie se recouvre d'un enduit noir que l'on fait très facilement disparaître par immersion dans une solution étendue d'acide azotique.

5° *Pour les antifrictions :*

u) Solution à 4 % de nitrate d'argent dans l'eau distillée.

6° *Mise en vue des inclusions :*

Pour différencier les ***inclusions***, signalées en général par simple polissage, on peut employer :

Le picrate de soude à chaud (*g*) qui attaque les sulfures, laissant intacts les oxydes;

v) L'hydrogène au rouge, qui réduit le protoxyde de fer;

w) Une solution aqueuse à 0,2 % d'acide oxalique qui met en vue les sulfures de manganèse et de fer en dissolvant le premier et laissant, dans le cas du second ou de solution des deux sulfures, une teinte rosée.

Lorsque l'attaque est terminée, on lave soigneusement, pour arrêter l'action du réactif, à l'eau distillée, à l'alcool ou à l'éther (ne pas toucher la face polie et attaquée avec quoi que ce soit) et on sèche à l'air comprimé.

D. *Examen et photographie.* — L'appareil couramment utilisé

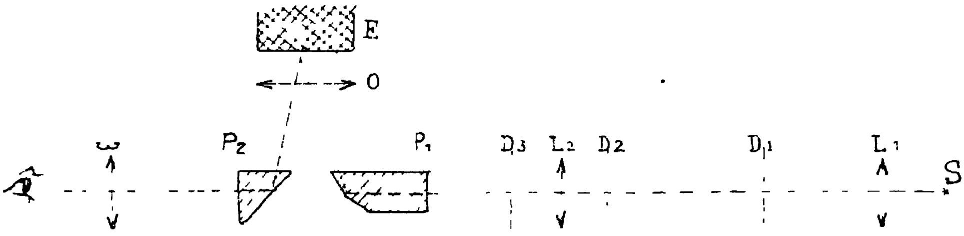


Fig. 37

Schéma du trajet du rayon lumineux dans le microscope métallographique « Le Chatelier »

dans le monde entier est le microscope inventé par Henry Le Chatelier.

Il se compose essentiellement d'un banc rectiligne horizontal sur lequel peuvent se déplacer (fig. 37 à 39) :

1° Une source lumineuse émettant des rayons horizontaux parallèles à la direction du banc;

2° Un bâti microscopique supportant l'échantillon à examiner et tout le système optique;

3° Une chambre photographique.

Le banc optique, d'une longueur de plus de 2 m, est en fonte; son poids assure à l'appareil une stabilité parfaite.

La *source de lumière* S est constituée, soit par un arc électrique

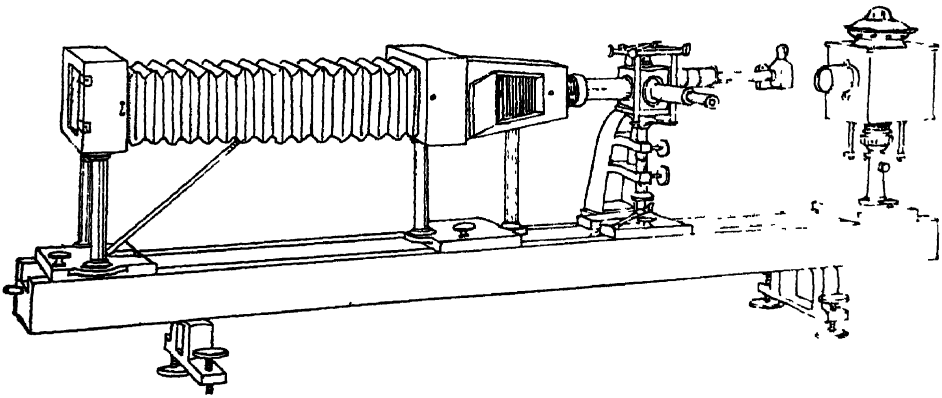


Fig. 38.
Banc métallographique « Le Chatelier ».

soit par une lampe à incandescence puissante (1.200 bougies) placée à l'intérieur d une lanterne avec lentilles L_1 pour la formation correcte du faisceau lumineux.

Le *bâti microscopique* comprend trois tubes horizontaux aboutissant à une petite chambre cubique centrale au-dessus de laquelle peut se déplacer verticalement une platine servant de support à l'échantillon. Le premier tube reçoit, à travers un diaphragme D_1 à ouverture variable, les rayons lumineux issus de la source S et les amène à la chambre centrale, après traversée d'une lentille convergente L_2 encadrée de deux diaphragmes D_2 et D_3; les rayons pénètrent alors dans un prisme à réflexion totale P_1, et sont renvoyés vers le haut de la chambre, dans l'objectif O, à axe vertical; ils traversent cet objectif, tombent sur l'échantillon E dont la surface polie est disposée horizontalement et tournée vers le bas, au-dessus de l'objectif, se réfléchissent sur cette surface, retraversent l'objectif et pénètrent dans un nouveau prisme P_2 situé au milieu de la chambre centrale, qui leur fait reprendre la direction horizontale. Suivant la situation de ce dernier prisme, susceptible de deux positions à 90°, l'une de l'autre (axe de rotation vertical) les rayons sont renvoyés, soit dans le deuxième tube, perpendi-

culaire au banc, où, grâce à un oculaire W, ils permettent la vision directe; soit dans le dernier tube, parallèle au banc, d'où, après

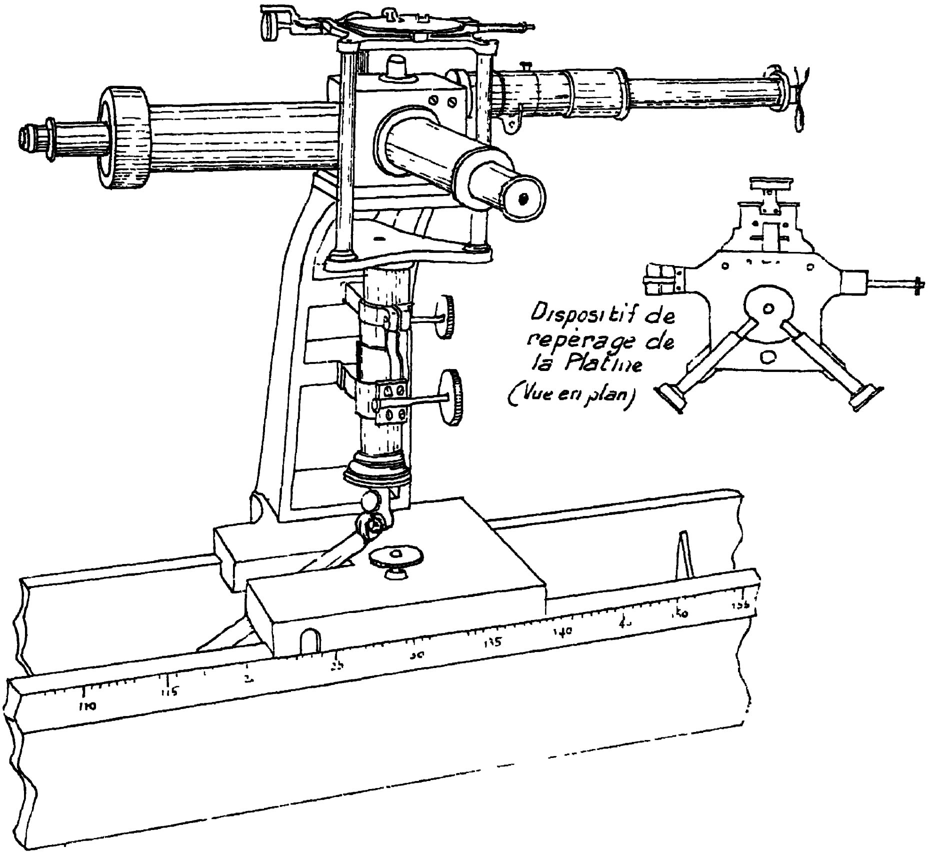


Fig 39

Bâti microscopique du Banc métallographique Le Chatelier

traversée d'un oculaire de projection, ils passent dans la chambre photographique.

Une cuve d'absorption peut être interposée sur le trajet des rayons lumineux entre la lanterne et le bâti microscopique.

Le déplacement vertical de la platine, s'effectuant au moyen d'un mouvement rapide à crémaillère et d'un mouvement lent à vis micrométrique, assure la mise au point (dans certains appareils le mouvement lent de mise au point est donné non à la platine, mais à l'objectif par rapport à la chambre centrale).

Le support de platine, constitué de trois colonnes, élimine toute possibilité de porte-à-faux de l'objet à examiner.

Cette platine est déplaçable dans son propre plan à l'aide de deux mouvements rectangulaires; ces diverses positions pouvant être repérées de façon très précise.

Enfin un système de repérage placé sur cette platine permet de retrouver exactement le même point d'un échantillon, ce qui est fort intéressant, par exemple pour étudier l'influence des traitements thermiques sur la structure.

La *chambre photographique* peut se développer par soufflet; la

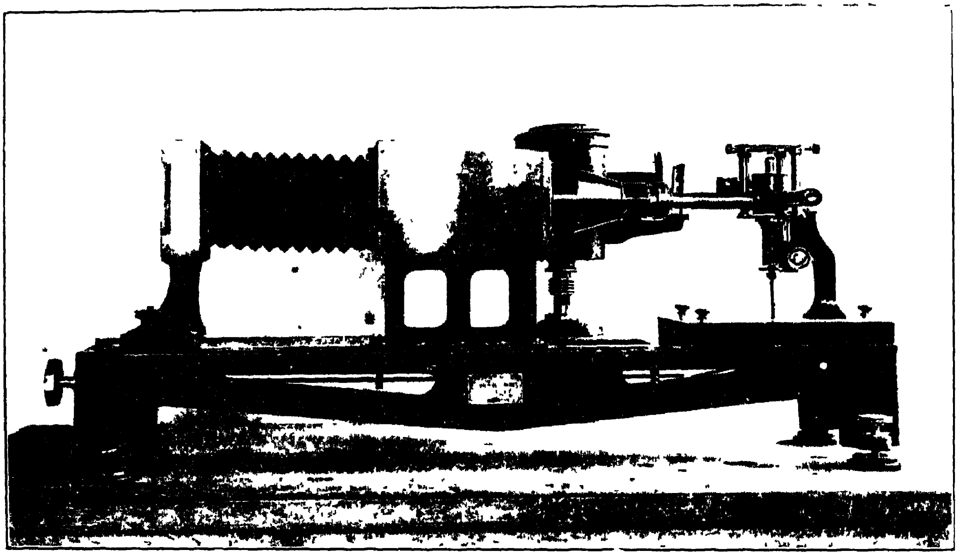


Fig. 40
Microscope métallographique « Le Chatelier »

mise au point photographique s'effectue à l'extrémité du banc, côté verre dépoli, à l'aide d'une transmission agissant sur le mouvement lent de mise au point.

On a toujours un certain nombre d'objectifs et d'oculaires, de façon à disposer d'une gamme de grossissements suffisante; pour les forts grossissements, à partir de 1.200, on est obligé d'employer des objectifs à immersion.

Enfin, certains bancs comportent un dispositif d'observation par transparence; une lampe située à la verticale de la platine éclaire

les divers objets, papiers, toiles, produits isolants, qu'on peut avoir à examiner, sous de faibles grossissements d'ailleurs, dans certaines industries.

Les figures 40 et 41 représentent, la première, un modèle de banc encore plus moderne que celui ci-dessus décrit; la seconde,

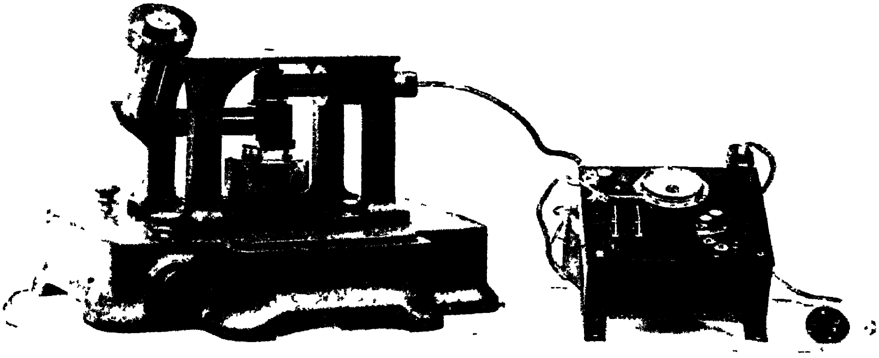


Fig. 41.

Microscope métallographique « Le Chatelier », mo triel.

un banc industriel pour emploi à l'atelier même, avec possibilité d'étudier la structure de pièces massives.

§ II. Macrographie. — La macrographie exige seulement un polissage rudimentaire, l'attaque consécutive met en évidence les hétérogénéités, les alignements de cristaux, les lignes d'écoulement du métal, l'aspect général de la structure, dont l'examen se fait le plus souvent à l'œil nu, parfois avec une loupe ou encore une binoculaire à faible grossissement. Cette méthode d'essai signale immédiatement :

1° *L'hétérogénéité chimique.*

Les régions les plus impures s'attaquent d'abord; on voit donc ainsi, les inclusions : scories, sulfures, phosphures, oxyde de fer en solution dans le fer, etc... qui nuisent toujours aux qualités du métal.

D'autre part, l'hétérogénéité chimique peut résulter de diffusion insuffisante dans des solutions solides entre des liquidus et solidus très écartés, ou encore de liquations ou de ségrégations, c'est-à-

dire de séparations qui se produisent entre les divers constituants de l'alliage au cours d'une solidification mal réglée; la macrographie permet à ce titre, d'abord d'étudier et de corriger ces conditions de solidification, ensuite de prélever convenablement les éprouvettes d'essais, les prises de dosage chimique, etc...

Elle permet également, en cas d'une action inégale des traitements thermiques dans toute la masse d'une pièce, de mettre en vue l'hétérogénéité structurale qui en résulte.

Enfin, l'hétérogénéité chimique peut avoir des causes naturelles comme les cémentations, soudures, brasures, recouvrements, etc...; la macrographie permet alors d'étudier les divers traitements, en particulier de repérer très exactement les épaisseurs de cémentation, ce qui, bien souvent, n'est fait dans l'industrie que d'une façon très approximative, par examen direct d'une cassure d'éprouvette témoin.

2° *L'hétérogénéité cristalline.*

Il faut ici que les cristaux soient assez gros pour que l'on ait un aspect macrographiquement visible (cas du métal brûlé et surchauffé, parfois du métal coulé).

3° *L'hétérogénéité mécanique.*

Soulignant les fibres du métal, ses lignes d'écoulement à la suite des traitements mécaniques, par suite de l'attaque rapide des parties écrouies, la méthode permet ainsi d'étudier les meilleures formes d'outils pour que les mouvements internes produits dans le métal par les traitements mécaniques donnent une structure générale normale, en harmonie avec les efforts que les pièces auront à supporter. Dans le même ordre d'idées, elle décèle les défauts des pièces mal fabriquées, celles dans lesquelles les fibres du métal ont été coupées, prêtant ainsi aux accidents, aux ruptures, etc... Elle permet enfin d'étudier les propriétés de l'alliage dans toutes les orientations possibles considérées par rapport aux directions des traitements mécaniques, par prélèvement convenablement orienté des éprouvettes d'essai.

Examinons maintenant la technique de la méthode.

A. *Prélèvement et polissage.* — La surface d'examen, souvent importante comme dimensions, est préparée avec soin, de façon à

éviter tout écrouissage et tout échauffement; puis elle est dégrossie à la meule ou à la lime, et passée à un ou plusieurs papiers émeris ou potées, suivant le degré de poli cherché, dépendant lui-même du but que l'on se propose. Elle est ensuite débarrassée de toute trace de corps gras par lavage soigneusement fait à l'aide d'un tampon d'ouate imbibé d'éther ou d'alcool.

La seule précaution à prendre est d'éviter des écrouissages locaux; pour cela, il est bon de finir le dégrossissage à la lime douce pour éviter l'apparition de traits d'outils après l'attaque.

B. *Attaque.* — Les diverses méthodes d'attaque peuvent être classées en cinq catégories :

1. *Attaque lente*, par immersion, exigeant plusieurs heures, parfois plusieurs jours, creusant profondément le métal, et créant ainsi un important relief, commode pour la photographie et pouvant être facilement conservé.

Il est bon de nettoyer de temps en temps la pièce (5 ou 6 fois par 24 heures), pour enlever les dépôts.

Les principaux réactifs sont, *pour les aciers* :

a) Solution d'acide sulfurique à 20 % dans l'eau distillée:

b) Réactif de Benedicks (solution à 4 % d'acide métanitrobenzolsulfonique dans l'alcool éthylique);

c) Solution à 2 % d'acide picrique dans l'alcool méthylique.

Pour les métaux autres que les alliages de fer : la plupart des réactifs micrographiques, déjà indiqués.

2. *Attaque rapide*, donnant en quelques minutes le résultat cherché, mais fournissant une surface attaquée facilement altérable; il est bon de régulariser l'attaque à l'aide d'un pinceau distribuant du réactif frais là où cela est nécessaire.

Les réactifs d'attaque rapide sont :

Pour les aciers :

d) Acide chlorhydrique pur;

e) Solution iodo-iodurée (corrosion, répartition du carbure dans les aciers spéciaux, etc...) :

Iode sublimé	10 gr
Iodure de potassium.	20
Eau distillée	100

Pour les alliages de cuivre :

f) Oxyde de cuivre ammoniacal, obtenu en précipitant par l'ammoniaque une dissolution de sel de cuivre, et ajoutant un léger excès d'ammoniaque jusqu'à disparition du précipité;

g) Solution acide de perchlorure de fer :

Alcool à 95 degrés.	750 cc.
Acide chlor. à 25 degrés Baumé	250 cc.
Perchlorure de fer.	34 gr

Il faut également ajouter à ces réactifs ceux déjà indiqués à la fin des réactifs micrographiques pour la mise en évidence des inclusions (picrate de soude à chaud, hydrogène au rouge, solution d'acide oxalique).

3. *Attaque par déplacement*, par immersion des pièces en alliages ferreux dans un réactif à base de sel de cuivre; il se dépose du cuivre sur le métal pendant que celui-ci entre en solution.

Il est très important d'agiter constamment le liquide, pour éviter la formation de bulles et une hétérogénéité de concentration dans le liquide de contact.

En ce qui concerne les aciers, les réactifs les plus courants sont : pour la mise en évidence de la structure d'ensemble :

h) Réactif de Heyn :

Chlorure double de cuivre et d'ammonium. . . .	10 gr
Eau distillée	120 gr

Pour la macrostructure, l'épaisseur de cémentation, l'oxyde de fer en solution :

i) Réactif Stead-Le Chatelier-Dupuy :

Alcool éthylique à 95°.	100 cc
Eau distillée	10 cc
Acide chlorhydrique concentré	2 cc
Chlorure de cuivre $CuCl^2$, 2 H^2O.	1 gr
Acide picrique.	0,5 gr

4. *Attaque par impression*, utilisée pour déceler les inclusions sulfureuses et phosphoreuses, par décalquage de celles-ci sur une surface sensible en contact avec le métal; pour cela le métal est attaqué par un acide qui provoque des dégagements gazeux de

sulfures ou phosphures sur les inclusions, d'où coloration de la surface sensible en ce point.

Cette méthode élégante a l'avantage de fournir un document facile à conserver.

Deux procédés sont employés :

Le premier, dit procédé de Baumann, est une impression sur papier photographique ordinaire au bromure, préalablement imbibé d'une solution aqueuse d'acide sulfurique à 3 %; on voit très nettement les taches locales de sulfures; le phosphore n'a pas d'action sur le bromure d'argent. Il faut naturellement avoir soin, comme d'ailleurs dans la seconde méthode, d'éviter toute interposition de bulle d'air entre le métal et la surface sensible.

Le second procédé, dit méthode de Heyn et Bauer consiste à appliquer sur le métal un papier imprégné de bichlorure de mercure et humidifié par une immersion préalable dans une solution chlorhydrique; les sulfures donnent des taches noires, les phosphures des taches jaunes.

5. *Attaque profonde et impression*, combinant pour les aciers les première et quatrième méthodes précédentes et constituant le procédé de Humphrey; le réactif est celui de Heyn, additionné d'acide chlorhydrique, soit :

Chlorure de cuivre ammoniacal	120 gr
Acide chlorhydrique concentré	50 cc
Eau distillée	1.000 cc

l'impression se fait au moyen d'encre d'imprimerie déposée par un rouleau, sur un papier dont le contact est assuré par une presse.

Le *lavage* se fait à l'eau distillée, à l'alcool ou à l'éther; l'emploi d'air comprimé pour le *séchage* n'est pas aussi indispensable qu'en micrographie.

C. *Examen et photographie.* — L'*examen* des macrographies se fait presque toujours à l'œil nu ou à la loupe; il peut parfois être utile d'approfondir l'examen à l'aide d'un microscope binoculaire ordinaire à faible grossissement, qui met nettement en relief l'attaque macrographique (attaque lente et profonde).

Les *photographies* des coupes macrographiques sont exécutées soit au moyen d'un dispositif adapté au banc Le Chatelier, soit avec un appareil photographique spécial.

L'adaptation du banc Le Chatelier, imaginée par M. Portevin, est réalisée comme suit : le bâti microscopique étant enlevé, on fixe à l'extrémité de la chambre photographique (côté opposé au verre dépoli) une boîte contenant deux prismes à réflexion totale;

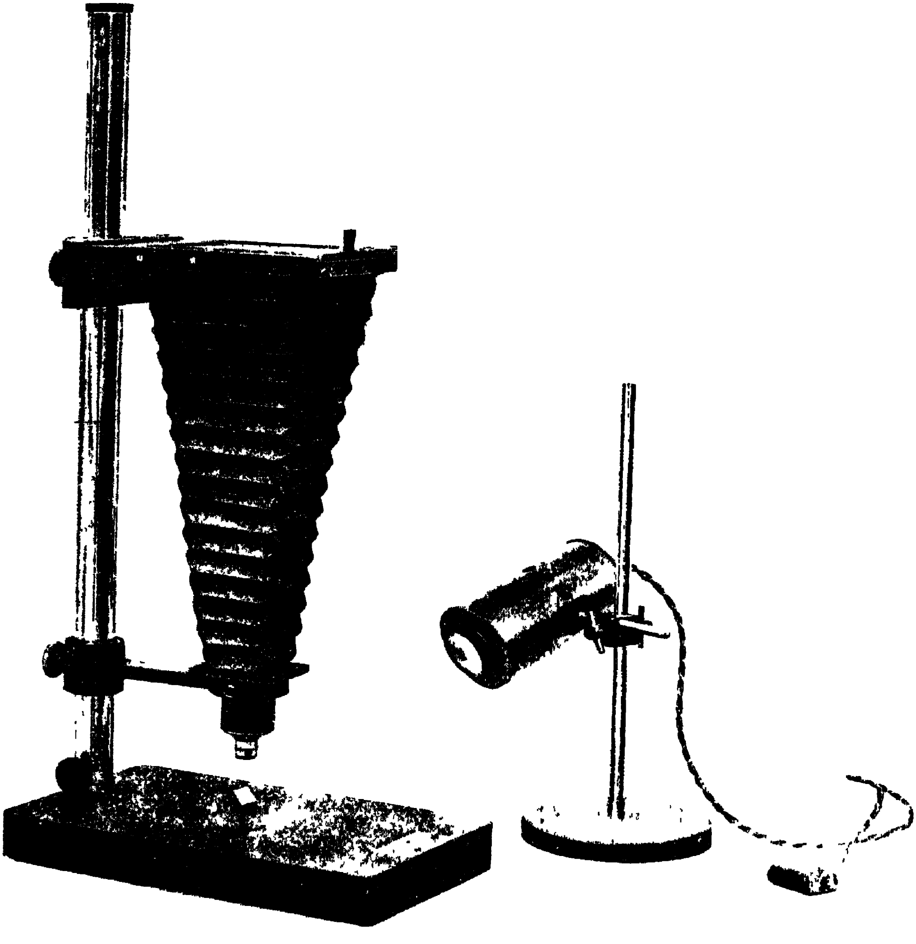


Fig. 42
Appareil pour photographies macrographiques.

au-dessous de ces prismes, une platine posée sur le banc et réglable en hauteur, reçoit l'échantillon, la section polie et attaquée étant disposée horizontalement et tournée vers le haut; les rayons lumineux émis par la lampe sont envoyés par le premier prisme sur la

face à photographier qui les renvoie sur le second prisme, lequel les dirige sur la plaque sensible.

Les appareils photographiques spéciaux pour macrographie sont, en général constitués d'une grande chambre verticale, l'objectif étant dirigé vers le bas (fig. 42); sous cet objectif, une platine reçoit la pièce ou l'échantillon; un condenseur puissant éclaire obliquement la section à photographier.

CHAPITRE VII

ESSAIS MÉCANIQUES

§ 1. Essais de traction.

L'*essai de traction est assurément* l'un des essais mécaniques le plus en vogue; bien qu'onéreux en raison de l'importance des machines d'essai, de la préparation délicate et assez compliquée des éprouvettes, et de la quantité de métal nécessaire, il présente un intérêt considérable et bien connu sur lequel il est inutile d'insister.

Les chiffres qu'il donne sont d'une utilisation immédiate et directe pour le calcul des résistances dans les constructions métalliques. Il permet l'étude de la limite élastique dont la détermination est primordiale pour connaître la tenue des pièces en service et escompter la durée de celles qui seront soumises à des chocs répétés.

A. — Caractéristiques de l'essai.

a_1) *Limite élastique. Charge de rupture.*

Limite élastique et résistance vive élastique. — Au moyen d'une machine de traction exerçons un effort sur les extrémités d'un barreau cylindrique. Portons en abscisses les allongements du barreau et en ordonnées les efforts exercés.

Nous obtenons la courbe O M N P (fig. 43).

Elle se divise en deux parties :

1° O M, sensiblement rectiligne : zone des déformations élastiques;

2° M N P, zone des déformations permanentes.

De O à M' projection de M sur O x, on a les allongements élastiques.

Quatre limites d'élasticité sont à considérer :

1° Limite d'élasticité théorique;

2° Limite d'élasticité proportionnelle;

3° Limite apparente d'élasticité;

4° Limite pratique d'élasticité.

1. Limite au-dessous de laquelle les allongements sont entièrement élastiques. Rien de pratique.

2. Limite au-dessous de laquelle les allongements sont propor-

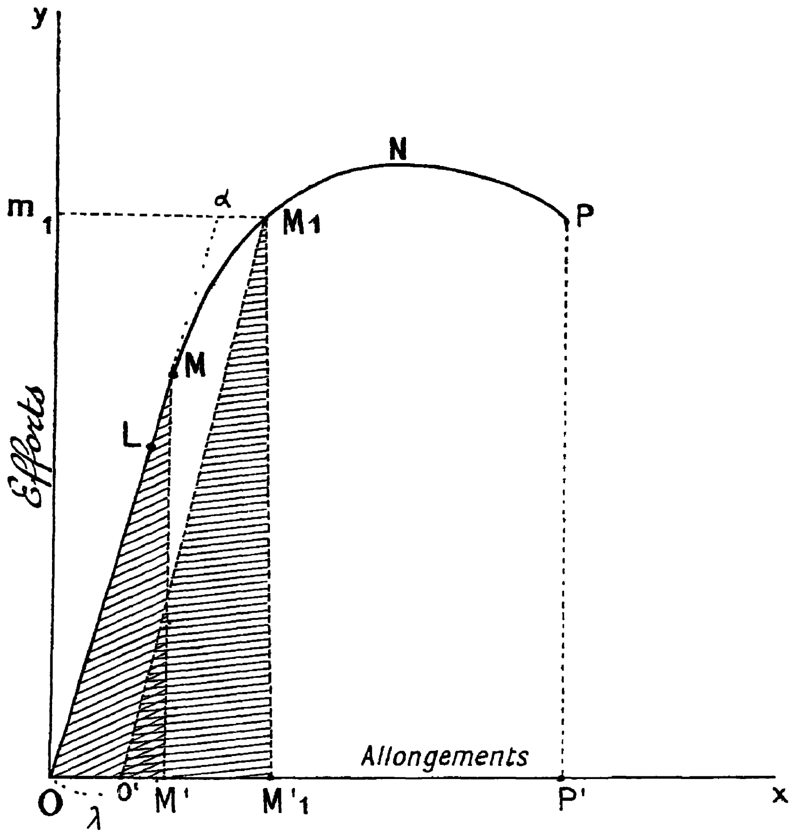


Fig 43

tionnels aux efforts. C'est la partie O M rectiligne. Applications très particulières.

3. Palier de la courbe de traction. Baisse du manomètre de la

machine de traction. Pas toujours visible. Peut induire en erreur, si l'on veut connaître la limite élastique aussi vraie que possible.

4° La Commission permanente de standardisation française propose la définition suivante (limite pratique d'élasticité).

« La limite élastique est la charge pour laquelle il commence à se produire une déformation permanente.

« *Pratiquement* et sauf indication spéciale, la mesure se fera à 1/500 près. On admettra donc que la clause fixant pour la limite élastique une valeur de *n* kg est remplie, si l'éprouvette, ayant été soumise à la charge correspondant aux *n* kg par millimètre carré pendant dix secondes, puis déchargée, revient à sa longueur primitive à 1/500 près (1). »

La tolérance admise sur une éprouvette de 100 mm entre repères serait donc de 2/10 de millimètre.

C'est sous les formes *c* et *d* que la limite élastique trouve son application dans les cahiers des charges.

Module d'élasticité. — Intéresse les parties de la courbe où les allongements sont élastiques.

C'est le rapport de la charge par unité de section initiale S_i à l'***allongement élastique*** par unité de longueur L_i que nous définirons plus loin (a_2).

(1) $$\frac{\frac{F}{S_i}}{\frac{\lambda}{L_i}} = \mu = \text{module d'élasticité}$$

Résistance vive élastique. — Intéresse la même partie de la courbe et est représentée par l'aire du triangle O M M'.

$$OM' = \lambda \qquad MM' = F$$

$$\text{Aire } OMM' = \frac{1}{2}\lambda \times F$$

D'après (1)

$$F = \mu \frac{S_i}{L_i}\lambda$$

(1) L'Aeronautique française a adopte 1/1000 au lieu de 1/500.
Sur 100 millimètres cela correspond à un allongement permanent de 1/10 de millimètre parfaitement mesurable.

Or

$$Si\,Li = V$$
$$Si = \frac{V}{Li}$$
$$F = \mu \frac{V}{Li^2} \times \lambda$$

Aire OMM′ ou résistance vive élastique $= \frac{1}{2} \mu \left(\frac{\lambda}{Li}\right)^2 V$

$\frac{\lambda}{Li}$ est l'allongement élastique.

Charge de rupture et résistance vive de rupture. — « La résistance ou charge de rupture est la charge la plus élevée atteinte au cours de l'essai, exprimée en kilos par millimètre carré de la section initiale. »

La résistance vive de rupture se mesure en planimétrant l'aire du diagramme de traction.

Elle s'évalue souvent grossièrement par le produit :

$$R \times A$$

de la charge de rupture par l'allongement.

Effets de l'écrouissage. — L'écrouissage est le phénomène cristallin interne provoqué dans les métaux ou alliages par les déformations à température peu élevée; il change la limite élastique en vertu de la loi de Coulomb.

Lorsqu'un corps a été déformé d'une façon permanente par un effort, sa limite élastique est égale à cet effort.

Exemple : Un barreau d'acier subit un effort supérieur de 15 kg à sa limite élastique.

Maintenu quelque temps à cette charge, il est abandonné à lui-même.

La nouvelle limite élastique est augmentée de 15 kg.

Si nous nous reportons au diagramme (fig. 22), le barreau a pris un allongement total $M_1\ m_1$.

Si l'on suppose l'allongement élastique proportionnel à la charge, $M_1\ \alpha$ est l'allongement permanent.

La longueur initiale devient donc :

$$L_1 + M_1 \alpha$$

soit :

$$o\,o' = \alpha\, M_1$$

Le nouveau diagramme devient :

$$O' M_1 \dot{N} P$$

Conclusions. — Dans un métal écroui, la ***résistance vive élastique*** est augmentée, puisque :

$$\text{aire } O' M_1 M'_1 > \text{aire } O M M'$$

mais la ***résistance vive de rupture*** est diminuée, puisque :

$$\text{aire } O' M_1 PP' < O MPP'$$

L'écrouissage donne au métal une dureté et une hétérogénéité qui ont comme corollaire la « fragilité ».

Si l'on prend R × A comme mesure grossière de la résistance vive, il arrive que, lorsque R double, A devient 7 ou 8 fois plus petit; la résistance vive devient donc environ 4 fois plus petite, ce qui peut avoir des conséquences graves.

a_2) *Striction et allongement.*

Loi de similitude. — Avant rupture, le barreau s'étrangle et la striction se produit.

Il y a la *striction répartie* ou *striction proportionnelle* qui correspond à l'allongement réparti et la *striction proprement dite*, qui correspond à la partie étranglée du barreau où se produit la rupture.

La striction proprement dite se définit par l'expression :

$$\Sigma\ \% = \frac{S_i - S}{S_i} \times 100 \qquad \begin{array}{l} S_i = \text{section initiale} \\ S = \text{section finale.} \end{array}$$

La forme de la striction est une des caractéristiques du métal.

L'allongement pour cent, avant striction, est constant pour un même métal, quels que soient le diamètre et la longueur.

L'allongement pour cent, après striction, sera différent pour des barreaux de même diamètre et de longueur différente, puisqu'il y aura une zone de striction identique pour les deux barreaux.

Ces allongements sont donnés par la formule :

$$A\ \% = \frac{L-l}{l} \times 100$$

l étant la longueur initiale,

L étant la longueur finale après rupture.

Les allongements pour cent, après rupture, seront égaux si les barreaux sont géométriquement semblables.

La loi de similitude s'exprime par :

$$\frac{L^2}{S} = \text{constante} = 66{,}67$$

Exemple de barreaux cylindriques types :

	D = 13^{mm} 8	S = 150 mm^2	L = 100 mm entre repères
et	D = 9,77	S = 75 mm^3	L = 70 mm entre repères

Allongements élastiques et allongements permanents. — De O à M, sur le diagramme, les allongements ne sont pas rigoureusement élastiques.

L'effort cessant, le barreau ne reprend pas absolument sa première dimension. Il possède un certain allongement résiduel.

Si λ est l'allongement mesuré sur le diagramme

λ' l'allongement résiduel.

$$\lambda - \lambda' = \lambda\left(1 - \frac{\lambda'}{\lambda}\right)$$

sera l'*allongement élastique.*

Pour que l'allongement reste *pratiquement* élastique, le Congrès de 1906 avait fixé pour le rapport $\frac{\lambda'}{\lambda}$ la limite supérieure de 0,001 % au delà de laquelle les allongements étaient considérés comme *permanents.*

B. — Mise en pratique de la méthode.

Nous ne pouvons mieux faire que reproduire ici le rapport que la Commission permanente de Standardisation a publié à ce sujet :

« I. *Machines d'essai.* — Les organes servant à la production de l'effort, comme ceux qui servent à le mesurer et qui doivent être distincts, doivent donner un fonctionnement continu; la vitesse de l'action doit être uniforme et ne pas être supérieure à 2 cm par minute.

« Les machines, comme les appareils d'attache, doivent présenter des dispositifs permettant au barreau de s'orienter librement dans la direction de la traction sans qu'il puisse se produire d'effort de flexion transversal.

« Les éprouvettes doivent être bien centrées dans les mordaches.

« La précision des graduations doit permettre les lectures à moins de 0,5 % de la charge maximum.

« Les machines d'essai doivent être fréquemment vérifiées au point de vue de la sensibilité et de l'exactitude, par les procédés spéciaux qui conviennent à chaque type de mécanisme. On pourra toujours effectuer rapidement une vérification d'ensemble ou tarage au moyen de barreaux de traction spécialement préparés, dont on détermine la résistance à la rupture; celle-ci doit être supposée connue d'après des essais préalables, soit sur une machine-type qui doit, de préférence, être vérifiée elle-même par suspension directe de poids marqués, soit par rupture directe de barreaux par suspension de poids marqués.

« 2. *Éprouvettes d'essai.* — Sur les éprouvettes soumises à la traction, on marque des repères servant à la mesure de l'allongement et situés à une distance des naissances des attaches ou des congés des têtes au moins égale au diamètre ou au plus grand côté de la section transversale de l'éprouvette.

« Pour les éprouvettes découpées dans une masse métallique, on emploiera de préférence la forme du barreau normal, ayant comme partie utile un cylindre de $13^{mm}8$ de diamètre (150 mm^2 de section) et 100 mm de longueur comprise entre repères.

« On peut obtenir des résultats sensiblement comparables en employant des barreaux géométriquement semblables, en parti-

culier, si la pièce dans laquelle on prélève l'éprouvette est trop petite pour permettre le découpage du barreau normal, on emploiera le barreau réduit géométriquement semblable, de 9mm 77 de diamètre (75 mm² de section) et 70 mm de longueur entre repères. Ces barreaux auront des têtes cylindriques, raccordées par des congés arrondis, s'appuyant sur les mordaches par tout le pourtour de leur circonférence ou saisies par des coins à griffes sur une longueur au moins égale au double du diamètre du barreau.

« Lorsqu'on essaiera des barres rondes brutes de forgeage ou d'étirage on pourra employer des barreaux sans tête en les saisissant par des coins à griffes sur une longueur au moins égale à trois fois le diamètre. La distance des repères destinés à la mesure de l'allongement sera déterminée par la formule

$$L^2 = 66.67\ S \text{ (S étant la section)}$$

« Pour les barreaux plats découpés dans des tôles ou des laminés et dont l'épaisseur est égale à celle du produit, un tableau fixe la largeur et la longueur entre repères.

« A titre d'exemple on peut citer les dimensions suivantes :

Largeur	Épaisseur	Section	Distance entre repères	Longueur calibrée
30	5	150	100	200
30	8	240	125	200
30	10	300	140	200
25	11	275	135	200
25	15	375	160	200
25	20	500	180	250
20	21	420	170	250
20	25	500	185	250
20	30	600	200	250

« Les têtes pourront présenter un trou dans lequel on passe une broche dont la section sera au moins le double de celle de l'éprouvette, ou être saisies par des coins à griffes sur une longueur égale au double de la largeur de l'éprouvette.

« 3. *Prélèvement et préparation des éprouvettes.* — Dans la plupart des cas les éprouvettes doivent être essayées dans l'état même où se trouve le métal de la pièce en examen, dont elles doivent caractériser les propriétés. Il sera nécessaire pour cela qu'elles soient découpées entièrement à froid à la machine-outil, et usinées avec

des précautions telles qu'on ne produise ni écrouissage superficiel, ni échauffement appréciable du métal. On fera ensuite disparaître les stries laissées par l'outil et la lime, soit par passage à la machine à rectifier (avec meule à eau), soit par polissage longitudinal à la lime douce et au papier d'émeri.

« Dans les cas où sera autorisé le découpage au chalumeau du fragment destiné à fournir l'éprouvette, il devra rester une épaisseur de métal de 15 mm au moins à enlever à froid.

« Lorsque l'épreuve a pour but de caractériser un métal qui doit être ultérieurement soumis à des opérations de forgeage ou simplement de cémentation, de trempe et de recuit, il n'y a plus lieu de prendre autant de précautions pour le découpage des éprouvettes. Celles-ci peuvent même être préparées, ou au moins dégrossies, par forgeage, mais les dimensions successives à réaliser doivent être clairement indiquées dans chaque cahier des charges. Les éprouvettes peuvent ensuite recevoir un traitement thermique, déterminé, dans chaque cas, d'après l'emploi que l'on veut faire du métal. Ce traitement thermique, qu'il consiste en un simple recuit ou en une succession de trempes ou de recuits, doit être défini de façon à pouvoir toujours être reproduit sans aucune incertitude, en indiquant, en fonction du temps, la succession des températures que doit prendre l'éprouvette. Les températures doivent être exprimées numériquement, rapportées à l'échelle normale des températures, et mesurées au moyen de pyromètres convenablement vérifiés. Le chauffage doit être effectué dans des fours à température uniforme, ou dans des bains métalliques, mais jamais dans des feux de forge.

« Les durées d'échauffement et du maintien des températures indiquées doivent être fixées en fonction des dimensions des pièces chauffées, de façon à donner l'assurance que la température est bien uniforme jusqu'au cœur de la pièce.

« 4. *Grandeurs mesurées dans l'essai de traction.* — La *limite élastique*, la ***charge de rupture***, l'***allongement*** et la ***striction***, dans les conditions précédemment fixées.

« L'*allongement* qui est l'augmentation de longueur rapportée à 100 mm, prise par l'éprouvette jusqu'à la rupture, se mesure en rapprochant les deux parties de l'éprouvette brisée et en relevant la distance des repères préalablement tracés sur l'éprouvette intacte.

« Cette mesure n'est valable que dans le cas où la cassure ne se

produit pas trop près d'une tête. On devra donc éliminer du calcul des moyennes, les barreaux pour lesquels la rupture se produira dans le quart extrême de la longueur utile (c'est-à-dire lorsque la distance de l'un des repères à la section de rupture est plus petite que le tiers de la distance de l'autre repère à la section de rupture).

« On peut éviter d'avoir ainsi à éliminer certaines éprouvettes, en marquant à l'avance un certain nombre de divisions égales entre les repères; on pourra alors déterminer l'allongement comme si la rupture se produisait au milieu de l'éprouvette, en tenant compte de ce que la déformation se produit systématiquement des deux côtés de la section de rupture. »

C. — Machines de traction.

C_1) *Types généraux de machines* — Les machines de traction peuvent être ramenées à deux types principaux :

1° Machines à engrenages;

2° Machines à pistons.

Toutes ces machines comprennent :

Un bâti fixe comportant l'une des mordaches de fixation de l'éprouvette;

Une partie mobile dans laquelle se place la seconde mordache;

Le système de production des efforts, agissant sur la partie mobile.

1° Les machines de la première catégorie produisent des efforts à l'aide d'une série d'engrenages entraînant une crémaillère qui commande la partie mobile.

Le dynamomètre Chèvefy rentre dans cette classe (fig. 44) : il est très utilisé pour les essais de puissance faible, ne dépassant pas 5 t; l'effort déplace un poids qui s'élève dans un plan vertical en suivant un quart de cercle gradué dont le point bas est à tangente horizontale; la position du poids sur l'arc de cercle renseigne sur l'effort exercé.

Les grosses machines (Trayvou, Falcot) pouvant produire des efforts de plusieurs centaines de tonnes, sont, soit horizontales, soit verticales.

2° Les machines de la deuxième catégorie (Guillery-Amsler-Delaloë) comportent une pompe actionnée par un moteur électrique,

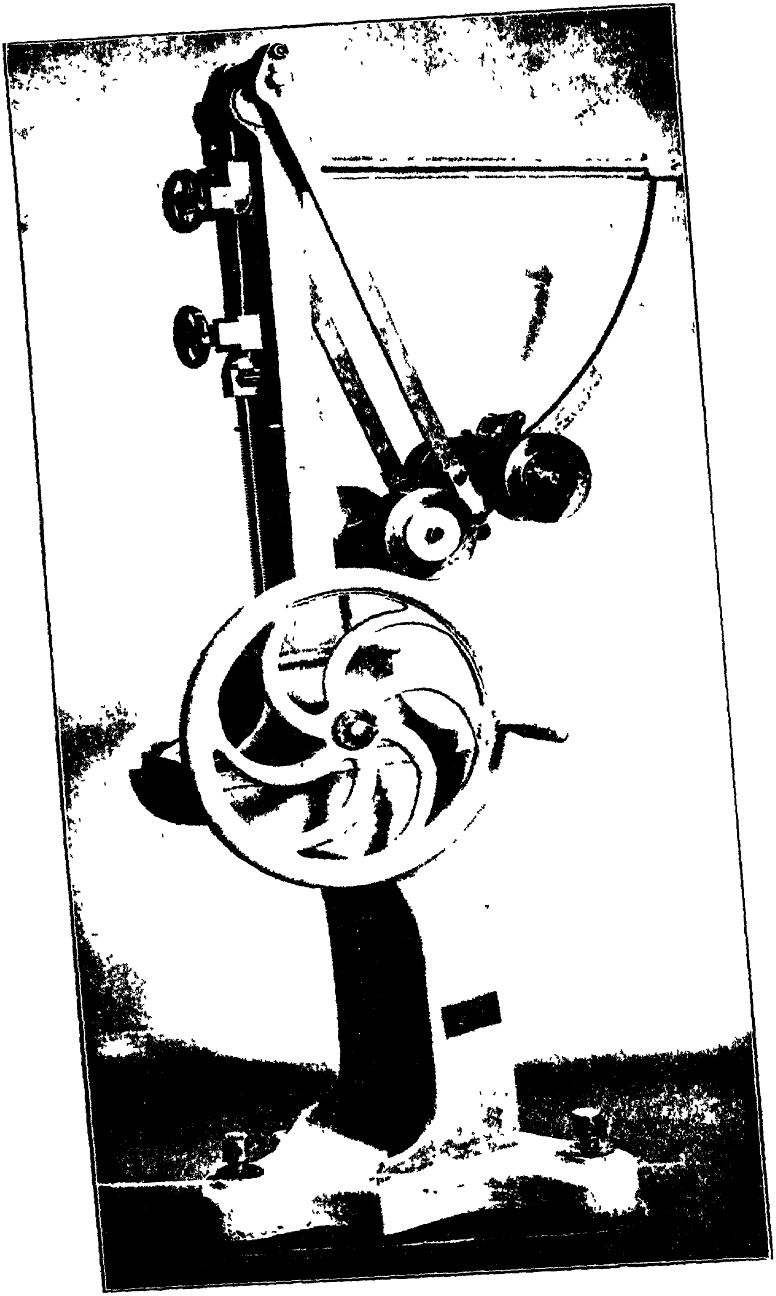


Fig. 44.
Dynamomètre à levier Chèvefy.

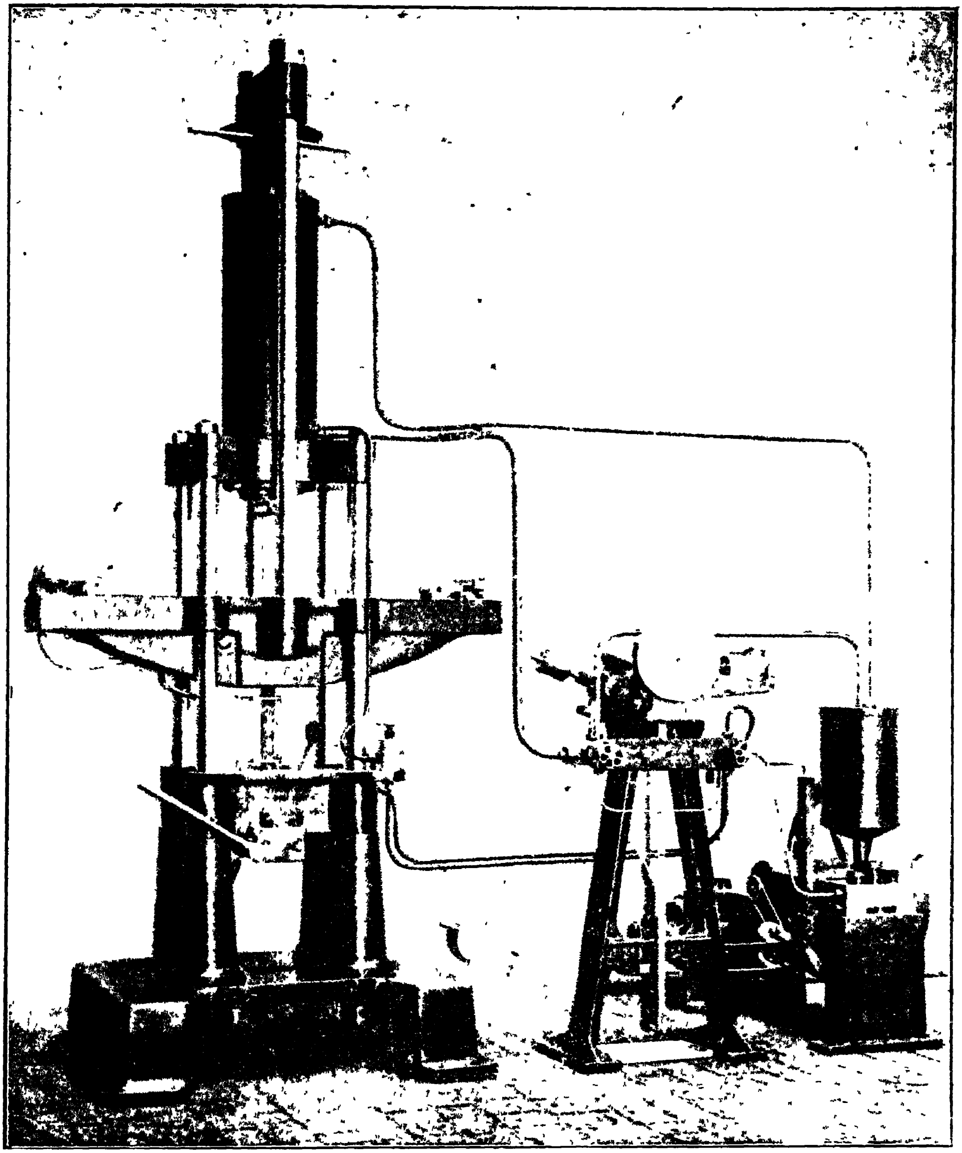


Fig. 45.
Machine Amsler de 50 tonnes

cette pompe envoyant de l'huile ou de l'eau glycérinée sous pression dans une presse dont le corps est relié au bâti fixe et dont le piston entraîne la partie mobile. Les machines Amsler (fig. 45) et Delaloë

peuvent également produire des efforts de plusieurs centaines de tonnes, et sont aussi soit horizontales, soit verticales. Nous reviendrons plus loin sur la machine Guillery.

Toutes ces machines comportent en général des dispositifs de fixation des éprouvettes montés sur rotules, de façon que le barreau s'oriente dans la direction de l'effort ; pour tractionner les fils, il arrive souvent qu'on enroule leurs extrémités sur des tambours remplaçant les mordaches (mais dans ce cas, il est impossible d'enregistrer le diagramme, car il se produit de temps en temps des glissements brusques du fil sur les tambours).

C_2) *Appareils enregistreurs.* — Les enregistreurs d'efforts sont souvent constitués par un levier soulevant un poids porportionnellement à l'effort fourni (dynamomètre Chèvefy, déjà indiqué) ou par une balance, genre romaine, que l'on maintient en équilibre par déplacement d'un ou plusieurs poids sur le fléau (machines Trayvou et Delaloë), ces déplacements étant effectués soit à la main, soit automatiquement; dans ce dernier cas, des contacts actionnés par le déplacement de l'extrémité du fléau, viennent

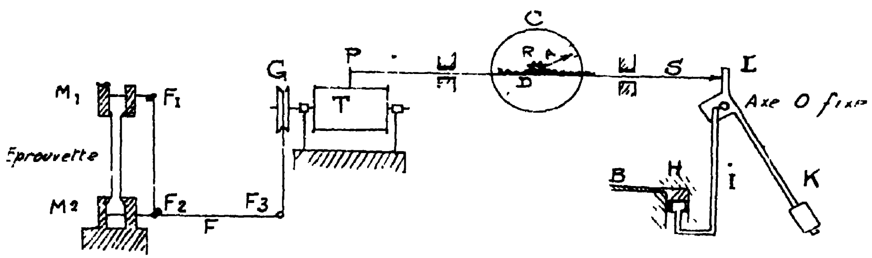


Fig 46
Enregistreur Amsler pour les essais de traction.

fermer des circuits assurant l'embrayage d'un servo-moteur qui déplace dans le sens convenable les poids sur le fléau.

On peut adjoindre à ces machines un système d'enregistrement automatique du diagramme de traction : un tambour cylindrique est animé d'un mouvement de rotation autour de son axe, mouvement produit par l'allongement de l'éprouvette (voir plus loin l'enregistrement Amsler), et une plume se déplaçant dans le sens des génératrices du cylindre proportionnellement à l'effort, vient tracer la courbe sur un papier enroulé sur le tambour.

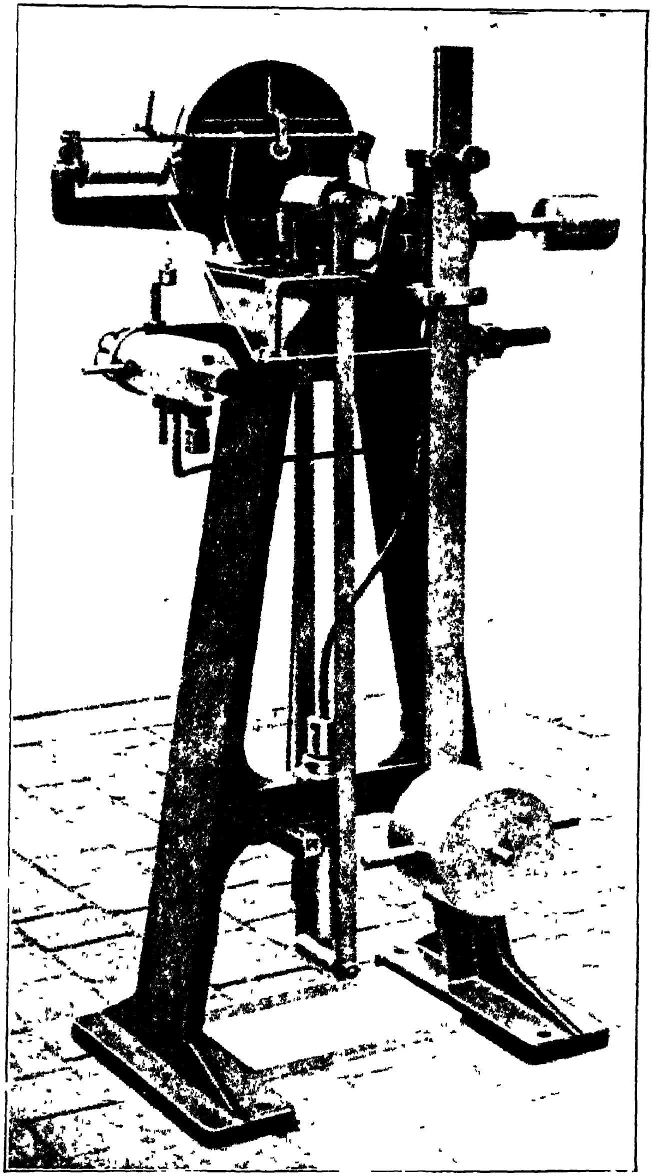


FIG. 47.
Dynamomètre Amsler à pendule

L'enregistreur Amsler (fig. 46 et 47) est particulièrement intéressant : on a ici un tambour T: un fil F attaché par l'une de ses

extrémités F 1 à la mordache mobile M 1, passe sur une poulie F 2 dépendant de la mordache fixe M 2, puis vient s'enrouler sur une poulie à gorge G calée sur l'axe du tambour; la rotation de ce tambour donne donc les allongements. L'enregistrement des efforts est réalisé à l'aide d'un dynamomètre à pendule : un petit cylindre H, dont le corps est fixe est relié par une canalisation B à la presse de la machine; il règne donc dans ce cylindre une pression égale à celle exercée dans la presse; le piston de ce petit cylindre entraîne une tige I qui provoque l'inclinaison d'un pendule K autour d'un axe O; au pendule est fixée une butée L qui vient appuyer sur une tige horizontale S, parallèle aux génératrices du tambour enregistreur; l'extrémité de la tige porte une plume P qui trace la courbe de traction; les déplacements de P sont, en effet, proportionnels aux efforts, mesurés par l'inclinaison du pendule; d'autre part, la tige S porte une crémaillère D entraînant une roue dentée R sur laquelle est calée une aiguille A se déplaçant devant un cadran gradué C; d'où l'indication, à chaque instant, de l'effort exercé par la machine; l'aiguille A entraîne pendant la croissance des efforts une aiguille folle qui reste en place lorsque A revient en arrière (effort de rupture atteint); cette aiguille folle indique donc cet effort de rupture. Enfin, le poids du pendule peut occuper plusieurs positions sur sa tige : d'où plusieurs efforts maxima correspondant à un tour de cadran, et autant de sensibilités différentes pour la machine.

Manomètre enregistreur Guillery. — Le manomètre enregistreur Guillery est dérivé des manomètres à piston et ressort (fig. 48).

Une droite verticale A B axe du cylindre *a* parfaitement rectifié, correspond au plan primitif de la crémaillère *b* et à l'axe du ressort *d* articulé au point fixe D.

Une bille *e* coulisse sans jeu appréciable et sans frottement dans le cylindre *a*, puis, un fil *f* partant de son centre C, la relie à la crémaillère.

La crémaillère est guidée par les galets *g* et le pignon *h* de commande de l'aiguille du manomètre, elle porte en outre un style *i* qui trace, en ordonnées, les charges sur un tambour *j* dont la rotation est sous le contrôle d'une autre fonction.

Un couple du contrepoids *k* maintient une tension constante sur le fil *f*.

Par le tube *l*, la bille est solidaire d'un cadre *m n o p* dont la traverse inférieure reçoit, par une baïonnette démontable, l'en-

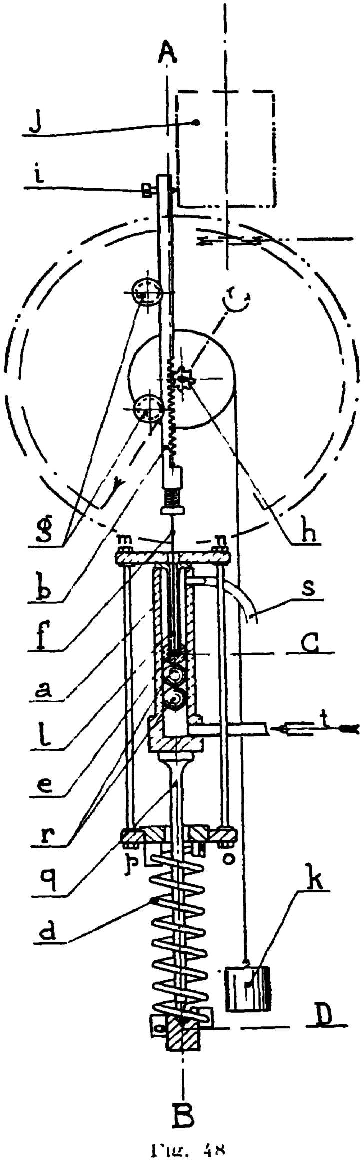


Fig. 48

castrement supérieur du ressort dont l'encastrement inférieur appuie sur la pointe D d'une tige *q* solidaire du cylindre *a*.

Deux ou trois billes *r*, de même diamètre que *e*, augmentent l'étanchéité du joint mobile que toutes les billes constituent.

La pression vient en *t* et les fuites retournent au réservoir par le tube *s*.

Le changement instantané du ressort permet le changement des sensibilités.

Ce manomètre peut d'ailleurs comporter un organe permettant le contrôle permanent de son exactitude.

C_3) *Appareils de mesure de la limite élastique*. — Dans certains cas, rares d'ailleurs, la limite élastique est très nettement déterminée par l'essai ordinaire.

Les allongements croissent brusquement tandis que les efforts restent constants, puis ces efforts recommencent à croître, on a donc un arrêt de l'appareil enregistrant l'effort et si l'appareil trace la courbe de traction, un palier sur cette courbe, d'où détermination immédiate de E.

Mais dans la majorité des cas, la courbe est du genre de celle représentée par la figure 43; la partie courbe se raccorde exactement dans le prolongement de la droite de déformation élastique; les enregistreurs directs de l'effort n'indiquent rien au passage de E, et la courbe ne permet pas une détermination précise. Lorsqu'il suffit de vérifier que pour un métal à essayer, E est supérieur à un certain nombre, déterminé par les cahiers des charges, on opère comme il est dit dans le rapport de la Commission permanente, sans chercher à mesurer reellement cette limite élastique; mais quand il s'agit de déterminer E, on est obligé de recourir à des procédés de mesure spéciaux; les plus intéressants sont les suivants :

1° M. Frémont a imaginé l'utilisation d'une éprouvette tronconique, polie de façon très avancée, que l'on tractionne sous un effort compris entre les limites élastiques totales des deux bases, et inférieur à la charge de rupture totale de la plus petite; la partie du tronc de cône pour laquelle la limite élastique est dépassée se dépolit par écrouissage, tandis que l'autre partie reste brillante; la limite élastique du métal est donnée par le rapport entre l'effort exercé et la section séparant les parties polie et dépolie.

2° L'extensomètre à miroirs Amsler permet en même temps la mesure du module d'élasticité; il se compose d'une barrette métal-

lique que l'on place parallèlement à l'éprouvette et dont l'une des extrémités est fixée à l'éprouvette; l'autre extrémité appuie sur l'arête d'un prisme dont une seconde arête touche l'éprouvette; l'allongement de celle-ci peut donc être mesurée par la rotation de ce prisme autour de sa première arête, fixe; on fait tomber un rayon lumineux sur le prisme et on reçoit le rayon réfracté dans une lunette se déplaçant devant une règle graduée.

3° L'extensomètre à anneaux de M. Mesnager est basé sur les interférences et offre une très grande précision.

Mais toutes ces méthodes sont longues et délicates (confection des éprouvettes Frémont, visées dans les deux autres procédés).

4° M. Guillery a construit une machine permettant des mesures faciles et rapides. Elle est du type à presse, deux pompes spéciales à grand rendement agissant, l'une pour les manœuvres rapides, l'autre pour l'attaque lente sous fortes pressions.

Le reste de l'appareil est basé sur la remarque suivante :

On peut facilement tracer les diagrammes d'essai de traction en s'arrangeant pour que la partie droite de la courbe, correspondant à la déformation élastique soit inclinée à 45° sur les axes de coordonnées; il suffit en conséquence de choisir les échelles des allongements et celles des charges, ou simplement l'une d'entre elles, l'autre étant invariable.

Ce principe est réalisé dans le mécanisme imaginé par M. Guillery. Les allongements sont donnés par une échelle qui les amplifie environ 2.000 fois; quant aux charges, elles sont représentées par une échelle variable au gré de l'opérateur, de façon à réaliser l'égalité : mesure des allongements = mesure des efforts.

Ainsi que le montre la figure 49, les allongements sont transmis par un quadrilatère double articulé, de l'éprouvette à la paroi mobile d'une chambre contenant de l'eau; les variations de volume sont accusées par le niveau dans un tube en communication avec cette chambre, et les sections de la paroi mobile et du tube sont telles que ce niveau descend dans le tube d'environ 2.000 fois la valeur de la croissance des allongements.

Les charges agissent sur un piston sans frottement qui appuie sur un ressort dont les flèches sont proportionnelles aux charges. Ces flèches sont, par des leviers et un galet interposé, transmises à la paroi mobile d'une deuxième chambre d'eau, en communication

avec le tube de la première. La charge, en montant, fait monter le niveau dans le tube.

Cette deuxième chambre porte, en outre, une autre paroi mobile, réglable à la main, pour amener le niveau au point voulu.

Le déplacement horizontal du galet réduit ou augmente les valeurs des charges, transmises à la paroi mobile de la deuxième chambre,

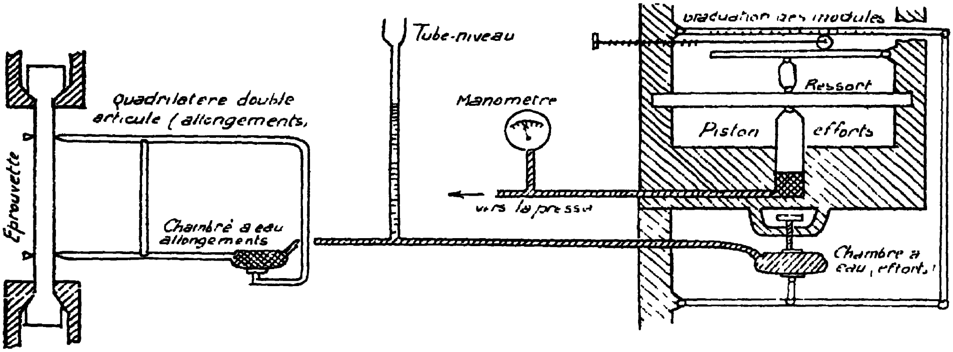


Fig. 49

Schema de l'enregistreur Guillery pour la mesure de la limite elastique et du module d'elasticité.

tout en leur gardant la proportionnalité; c'est l'échelle variable des charges qui permet d'obtenir, en tâtonnant, mesure des allongements = mesure des efforts, c'est-à-dire le niveau constant dans le tube pendant l'ascension de la charge sur le barreau.

La position horizontale du galet définit le module d'élasticité si les divers barreaux à essayer ont la même section, ou, s'ils n'ont pas la même section, une variation de l'échelle des allongements a préalablement opéré la correction nécessaire.

Un baromètre donnant la pression dans la presse, renseigne à chaque instant sur la valeur des efforts.

Fonctionnement. — Le barreau étant mis en place avec ses touches à distance fixe, on règle à la main le niveau à une hauteur convenable dans le tube. On donne alors une certaine pression qui indique si le niveau monte ou descend; on retire la charge et l'on déplace le galet dans le sens qu'a indiqué le premier essai; après deux ou trois tâtonnements, le niveau reste constant. La position du galet sur l'échelle du levier donne le module d'élasticité.

On pousse alors l'essai jusqu'au moment où le niveau commence

à descendre. C'est la limite élastique, et la pression manométrique l'indique.

En continuant à faire croître l'effort, on arrive à la rupture,

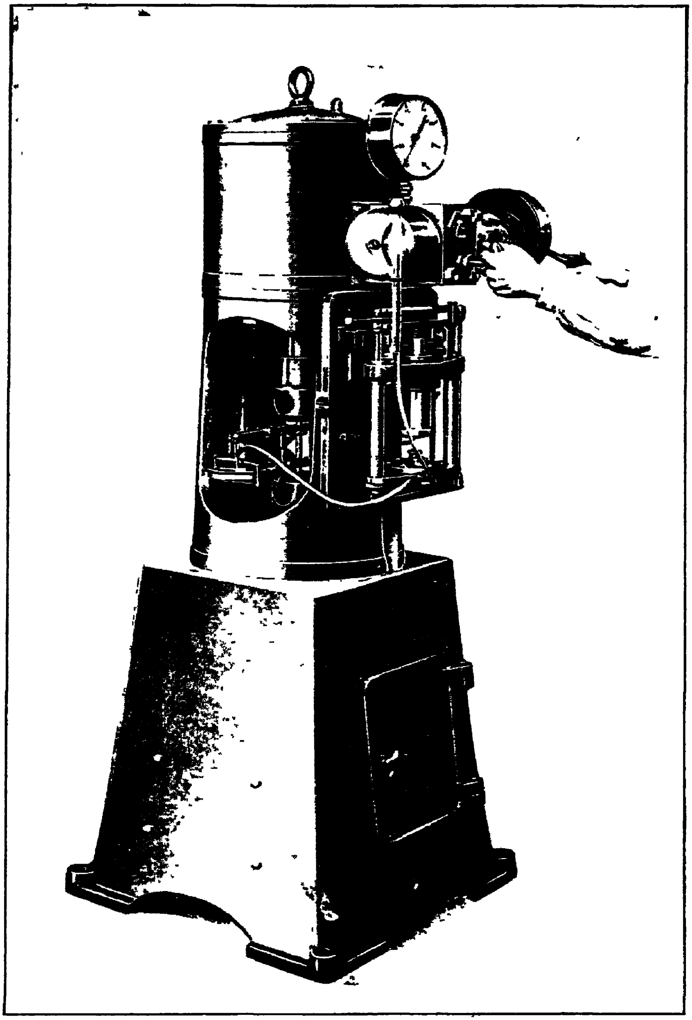


Fig. 50.
Machine Guillery pour la mesure de la limite élastique et du module d'élasticité.

l'effort maxima lu au manomètre donne la charge de rupture. Les allongements et la striction s'opèrent par des mesures directes sur l'éprouvette rompue.

D. — Tarage des machines de traction.

Les méthodes les plus sûres en même temps que les plus pratiques sont les suivantes :

1° *Tarage direct par poids ;*

2° *Tarage par comparaison* avec une machine étalon. On part d'une machine-type bien étalonnée, par exemple celle du Laboratoire d'essais du Conservatoire national des Arts et Métiers. On choisit un métal bien homogène et on prend un certain nombre de barres de ce métal, de section et de nuances telles que les efforts de rupture de ces barres s'échelonnent régulièrement entre les limites de puissance de la machine; on taille dans chaque barre huit barreaux numérotés de 1 à 8 d'une extrémité de la barre à l'autre; les barreaux impairs sont, après recuit convenable, essayés à la machine étalon; les barreaux pairs, après le même recuit, à la machine à tarer : soient R_1, R_2, R_3, R_4, les résultats, rangés par ordre de valeur croissante, obtenus sur la machine à tarer; R est défini par $\frac{R_2 + R_3}{2}$, le métal étant considéré comme suffisamment homogène si $(R_4 - R_1)$ est inférieur à 4/100 de R_4 ; on fait de même avec les efforts obtenus sur la machine à tarer, et on compare les résultats. Puis on établit la courbe de tarage de la machine.

Si l'on veut rerégler la machine en utilisant ces résultats, on opère un nouveau contrôle après réglage; on prend alors 12 éprouvettes, au lieu de 8, dans chaque barre de métal; on essaye à la machine-étalon les éprouvettes 1, 4, 7 et 10; le premier essai sur la machine à tarer est fait avec les barreaux 2, 5, 8 et 11 et le contrôle après réglage avec les barreaux 3, 6, 9 et 12.

3° *Tarage à l'aide de l'appareil Guillery pour le contrôle des manomètres.* — A son manomètre enregistreur déjà décrit, M. Guillery adjoint un dispositif de contrôle permanent (fig. 51).

Dans un cylindre à axe vertical *a*, du même genre que celui du manomètre, se meut une bille *e*, rendue solidaire d'un cadre *m*, *n*, *o*, *p*, par l'intermédiaire d'une entretoise *l* ; des billes semblables à *e* aident à l'étanchéité.

Sur la base *o*, *p* du cadre viennent s'accorcher les branches supportant un plateau démontable *u*.

L'arrivée de la pression se fait en t et les fuites qui peuvent passer entre les billes et le cylindre, retournent par le tube S au réservoir.

On conçoit qu'une charge en poids étalonnés P, placée sur le pla-

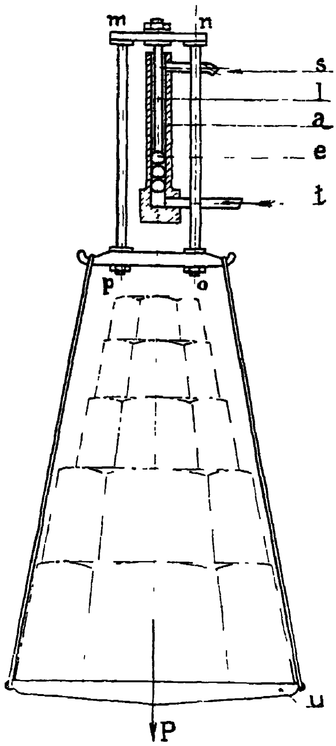


Fig. 51

teau de balance u, s'ajoutant au poids p des trois billes, du cadre et de la balance, doit porter la pression dans le cylindre à $\frac{4(P - p)}{\pi d^2}$ d étant le diamètre de la bille.

Si donc la conduite t est en communication avec celle correspondante du manomètre enregistreur ou avec rampe portant plusieurs manomètres, tous les manomètres doivent indiquer la pression $\frac{4(P + p)}{\pi d^2}$.

E. — Quelques résultats.

Les plus grandes charges de rupture par mm² connues sont de 200 à 250 kg; elles sont obtenues sur aciers durs trempés et écrouis (cordes à pianos); la limite élastique de ces aciers se confond d'ailleurs avec la charge de rupture, les allongements étant nuls.

Des allongements dépassant 100 % sont obtenus avec certains aciers au nickel ou au manganèse; leur charge de rupture est voisine de 60 kg. Les charges de rupture et les allongements des principaux métaux sont indiqués dans le tableau suivant (état laminé et recuit) :

	R	A %
Nickel	50	40
Fer électrolytique	30	40
Platine	25	10
Cuivre	22	42
Zinc	12	16
Magnésium	14	»
Aluminium	11	40
Argent	22	40
Or	11	30
Étain	2	»
Plomb	1	»

Quant aux modules d'élasticité, qui mesurent en quelque sorte la plus ou moins grande facilité avec laquelle un métal supporte les efforts sans se déformer, on n'est pas encore fixé de façon tout à fait rigoureuse sur leurs valeurs : les aciers donnent un module d'élasticité compris entre 22.000 et 24.000, le traitement thermique ne semblant pas avoir d'influence; pour les fontes, au contraire, la constitution amène des fluctuations considérables du module, variable entre 8.000 et 19.000. Les recherches actuelles s'orientent vers des déterminations précises de ce très important coefficient mécanique.

§ 2. Essais de viscosité.

L'étude de la viscosité des alliages est relativement récente.

Des études de M. Chevenard, il résulte que la viscosité d'un métal diminue au fur et à mesure que sa température s'élève (1).

(1) Chevenard, *Sur la viscosité des aciers aux températures élevées. C. R.*, XVII, 1919, 712.

La vitesse d'allongement de l'éprouvette, rapidement croissante, au moment de la mise en charge, devient constante et l'allongement est soumis à une loi $l = f(t)$ (t représentant le temps) dépendant de la nature de l'alliage, de la charge et de la température.

Ultérieurement MM. H. et F. Le Châtelier (1920), Dickenson (1922), Lea (1924) ont étudié ce phénomène.

Des expériences de ce dernier, il résulte que les allongements

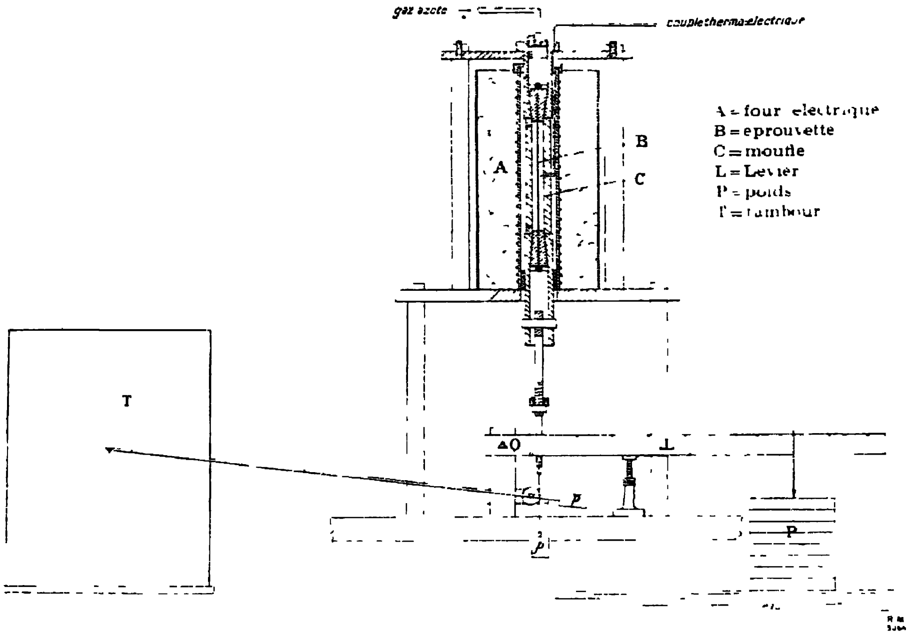


Fig. [illegible]

Viscosimètre

augmentant d'abord avec le temps devenaient constants lorsque la charge est inférieure à une certaine *valeur limite ;* pour une charge supérieure, les allongements continuent à croître linéairement en fonction du temps jusqu'à *rupture.* Cette valeur limite a reçu de Lea le nom de *limite d'écoulement.*

En 1925, MM. Cournot et Sasagawa ont repris la question en opérant à chaud des tractions sur des fils de 1 mm² de section et de 100 mm de longueur. Par un dispositif expérimental spécial, ils corrigent l'influence de la diminution de section pendant la traction (fig. 52 et 52 *bis*).

Pour chaque métal et pour une température déterminée on trace pour une série de charges progressives les courbes donnant les allongements en fonction du temps.

Si la courbe d'*allongements-temps* est pratiquement un palier,

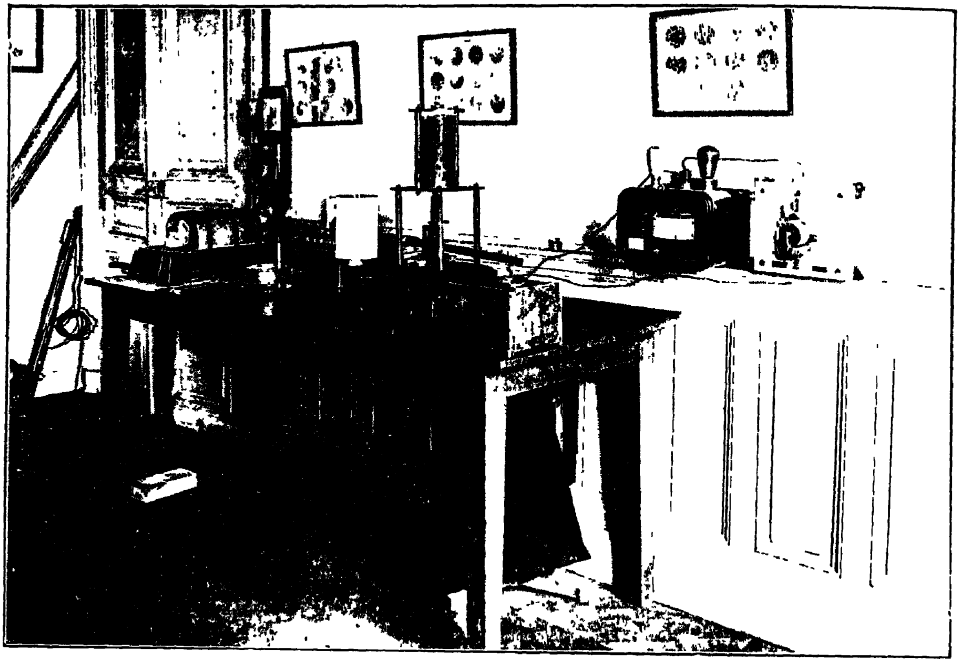


Fig. 52 *bis*
Viscosimètre avec son régulateur automatique de température

c'est qu'à la température de l'essai et pour la charge considérée la *limite pratique de viscosité* n'est pas atteinte (fig. 53).

Les expériences ont montré qu'au-dessus de cette charge limite, et pour une température déterminée la déformation se poursuit à une vitesse constante dont la valeur croît avec la température.

On peut ainsi déterminer avec précision cette limite et la définir comme suit :

La limite pratique de viscosité est le point au-dessus duquel le métal sous charge et température constantes commence à se déformer avec une vitesse constante.

Les auteurs signalent l'écart considérable entre les charges de rupture et les charges limites de viscosité.

Ainsi à 700° pour un *acier doux* la charge de rupture et la limite de viscosité sont respectivement de 11 kg et de 1 kg — pour un acier rapide, on a respectivement 36 et 7.

Pour un alliage nickel-chrome 42 et 17.

Si on veut la sécurité indispensable dans le travail à tempéra-

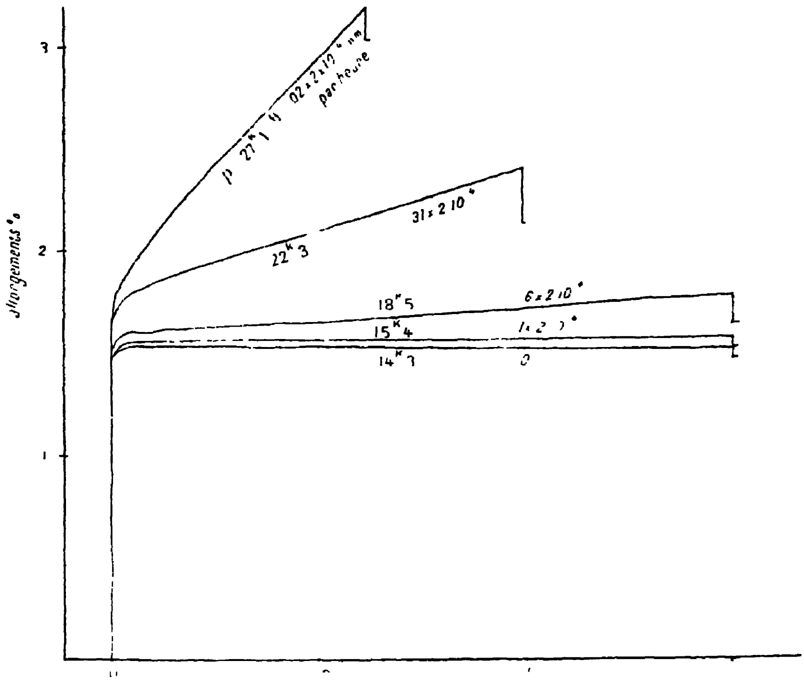


Fig. 53.

Acier rapide. Température 600° C. Limite de viscosité : 14,5 kg.

ture élevée, il faut tenir compte, d'une façon impérative, de cette limite de viscosité.

§ 3. Essais de dureté.

Les méthodes d'essai de dureté sont les suivantes :

1° La méthode du *scléromètre*, qui consiste à produire sur le métal, à l'aide d'une aiguille d'acier trempé, une rayure dont on mesure la largeur;

2° La méthode du *scléroscope*, qui utilise un poids tombant sur le métal; la dureté étant caractérisée par la hauteur du rebondissement (méthode Shore);

3° La méthode du *pendule*, toute récente, et encore dans la période de mise au point;

4° La méthode *Brinell* (*essai à la bille*), la plus importante de beaucoup, constituant l'essai le plus repandu actuellement dans l'industrie.

Nous allons étudier en particulier et en détail cette dernière méthode.

Méthode de Brinell.

a) *Principe de la méthode.*

Le principe de la méthode de Brinell est le suivant : une bille en acier extra-dur de diamètre déterminé, le plus souvent 10 mm,

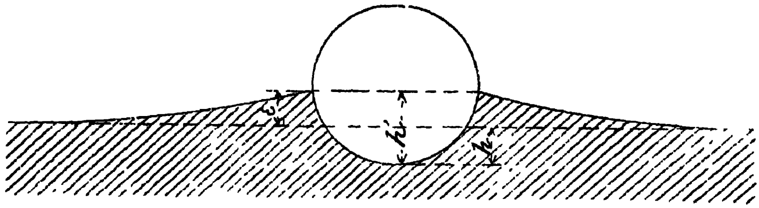


Fig. 54.
Aspect général de la coupe de l'empreinte.

est appliquée sous une charge également bien déterminée, sur la surface dressée du métal à essayer, la direction de la charge étant perpendiculaire à la surface; il en résulte une empreinte en forme de calotte sphérique dont on mesure aisément le diamètre dans le plan d'affleurement (fig. 54), on en déduit le « chiffre de Brinell » Δ, caractéristique de la dureté, et défini par le rapport :

$$\Delta = \frac{P}{a} = \text{chiffre de Brinell}$$

P étant la charge sous laquelle a eu lieu l'essai, et a la surface de la calotte sphérique, en millimètres carrés. L'importance de ce chiffre Δ varie donc dans le même sens que la dureté.

La dureté est une caractéristique mécanique des plus intéressantes : les constituants des alliages possèdent en effet des duretés variables d'un constituant à l'autre, variables aussi pour le même constituant suivant la structure cristalline résultant des différents traitements auxquels le métal a été soumis. On voit donc immédiatement l'immense intérêt présenté par cette méthode qui a, de plus, l'avantage d'être d'un très faible prix de revient.

b) *Double aspect de l'essai de dureté.*

1° *Détermination approchée de la charge de rupture.* — Il existe une relation entre la dureté et la charge de rupture à la traction, on a en effet :

$$R = K \times \Delta$$

K étant une constante *pour une catégorie déterminée d'alliages considérés à l'état recuit ;* par exemple K = 0,34 pour les aciers, 0,5 pour le cuivre et les laitons, etc... *Mais il n'existe plus de semblable relation pour les produits non stabilisés par recuit.*

Il ne faudrait pas déduire de là que la dureté fait connaître exactement le métal étudié, cet essai ne fournit aucune indication sur les valeurs de la limite élastique, des allongements, de la résilience, etc..., et un même chiffre de Brinell peut être donné par des alliages de compositions très différentes (par exemple, acier ordinaire demi-dur à 0,5 % de carbone et acier au nickel à 0,01 % de carbone et 5 % de nickel) dont les autres caractéristiques mécaniques et par suite les emplois sont très dissemblables.

2° *Contrôle de l'homogénéité.* — La méthode de la bille peut être une méthode originale revêtant un caractère particulier et décelant une propriété spéciale, l'homogénéité. L'extrême simplicité de l'essai à la bille permet de faire de nombreuses empreintes dans toutes les régions de la pièce.

Les divergences entre ces empreintes sont causées à la fois par les erreurs commises dans les expériences et les mesures et par le manque d'homogénéité du métal.

Nous nous sommes attaché à déterminer les erreurs expérimentales commises.

Leur connaissance permet de déduire le nombre de dureté aussi rigoureusement que possible. Le contrôle de l'homogénéité en est la conséquence. Nous résumons les résultats acquis (1).

Erreurs expérimentales dues à la mesure de l'empreinte. — L'expérience a montré que la bille, en s'enfonçant dans le métal sous une pression de 3.000 kg, provoquait un soulèvement de ce métal.

La figure 54 représente l'aspect général de la coupe de l'empreinte.

D'après ces formes d'empreinte, on conçoit que la mesure de la calotte sphérique puisse donner lieu à des difficultés spéciales.

Si l'on appelle D le diamètre de la bille, d le diamètre de l'empreinte, h la profondeur de cette empreinte, l'expression de la surface a de la calotte sphérique est

$$a = \pi D h$$

ou

$$a = \pi D \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2}$$

1° On peut mesurer h, profondeur de l'empreinte, et en déduire a, mais h' mesuré $= h + \varepsilon$ sera généralement trop grand, étant donné le relèvement des bords de l'empreinte. Il y a donc là une cause d'erreur;

2° On peut mesurer d, la largeur de l'empreinte, et en déduire a.

Mais on mesure un d généralement trop grand, étant donnée l'ovalisation de la bille sous la pression. Il y a donc encore là une cause d'erreur.

De nos expériences, il résulte que les deux erreurs commises, à savoir :

La première en exagérant la profondeur d'empreinte;

La deuxième en partant d'un diamètre faussé par suite de l'ovalisation de la bille, — sont des erreurs du même ordre.

On trouve par les deux moyens des chiffres de Brinell identiques.

On a donc le choix entre les deux procédés.

Erreurs dues aux appareils. — Les appareils de compression, les billes, les appareils de mesure, judicieusement employés comme il

---

(1) Voir *Recherches sur la dureté et la fragilité des aciers*, par le capitaine Grard (*Revue d'Artillerie*).

est indiqué ci-après, n'ont pas totalisé d'erreurs supérieures à 5 unités Brinell.

Influence des conditions d'expérience. — En adoptant les précautions spécifiées au paragraphe (*c*), il n'y a pas d'erreur de ce chef.

Conclusions pour l'homogénéité. — Si N est le nombre exact de dureté,

$$N \pm 5$$

représente les variations imputables aux erreurs expérimentales.

Deux nombres de dureté, relatifs à deux empreintes exécutées sur un même acier parfaitement homogène, ne devront pas différer de plus de 10 unités.

Les différences supérieures à 10 devront être attribuées à une variation dans la répartition des constituants du métal.

On a ainsi un procédé précieux pour contrôler l'homogénéité d'un métal déterminé.

Cette clause d'homogénéité pourra être introduite utilement dans les cahiers des charges.

c) *Mise en pratique de la méthode de la bille. Précautions à prendre.*

Les conditions à imposer aux machines sont les suivantes : il faut qu'elles soient disposées de façon à développer graduellement l'effort et sans produire aucun à-coup; en outre, la surface de la pièce à essayer doit pouvoir être disposée dans un plan bien normal à la direction de l'effort.

Valeur de la charge et dimension des billes. — La charge est le plus souvent, pour les produits sidérurgiques, de 3.000 kg; pour le cuivre, l'aluminium et leurs alliages, on la prend de 500 kg ou plus rarement 1.000 kg; la bille est presque toujours de 10 mm de diamètre, parfois plus petite. Il faut en effet que l'empreinte ne soit ni trop faible, ni trop profonde, la sensibilité de ce procédé de mesure de la dureté décroissant très rapidement dans les deux cas; pour les métaux extrêmement durs, on est donc amené à prendre de petites billes (5 mm de diamètre) avec la charge maxima de 3.000 kg, pour les métaux mous à adopter la bille de 10 mm en réduisant la pression.

Usure des billes. — L'usure et la sphéricité de la bille doivent être vérifiées fréquemment.

Temps d'application de la charge. — Le temps d'application de la charge n'est pas indifférent; le métal étant en effet un peu plastique, l'empreinte définitive ne se produit pas immédiatement; elle croît, de plus en plus lentement, jusqu'à sa valeur réelle, et on admet qu'une empreinte n'augmente plus après cinq minutes de mise en charge; pratiquement les valeurs de la vitesse et du temps d'application n'ont pas d'importance pourvu que dans une même série d'essais ou dans des essais comparatifs, on adopte les mêmes valeurs; il suffit de les spécifier quand on communique les résultats (la Commission permanente de Standardisation fixe la durée d'essai à quinze secondes).

Préparation des surfaces. — Il est bon, avant essai, de polir au papier émeri fin la surface du métal qui doit porter l'empreinte; on obtient ainsi une surface plane nécessaire à la bonne formation de la calotte sphérique.

D'autre part, il faut prendre garde de ne pas avoir sur le métal de couche superficielle hétérogène constituée par des oxydes par exemple ou due à une décarburation, et provenant en général de l'action des traitements.

Cette couche de dureté différente du métal, provoquerait des erreurs dans la détermination de la dureté d'après le diamètre de l'empreinte; un polissage suffisamment accentué évitera cet inconvénient; il faudra cependant faire attention de ne pas provoquer d'écrouissage superficiel au cours de ce polissage.

Autres précautions. — Comme autres précautions à prendre pour cet essai, il y a lieu de signaler les points suivants :

Il est nécessaire de ne pas faire d'empreintes à trop faible distance les unes des autres sur le même échantillon, de crainte de l'écrouissage que la première communique au métal dans son voisinage (empreintes non circulaires);

On doit employer des éprouvettes d'essai de dimensions suffisantes, une empreinte sur lame mince ou en bout d'une barre de diamètre insuffisant ne pouvant donner aucun résultat valable, surtout si le métal est très plastique (antifriction);

Ou bien alors si l'on veut opérer sur lames très minces, il faut employer de très petites billes sous faibles pressions;

Enfin il y a lieu d'apporter beaucoup de soin au prélèvement des

échantillons comme cela a déjà été signalé pour les autres sortes d'essais.

Contrôle des machines d'essais. — Le contrôle des machines d'essai est effectué à l'aide d'un métal bien homogène sur lequel on produit des empreintes avec l'appareil à régler et avec une machine étalon (ou avec des poids marqués) en veillant à ce que toutes les conditions d'essai (vitesse et temps de mise en charge) restent bien identiques dans les deux cas (1).

Mesure de Δ. — Pour déterminer Δ, on mesure seulement le diamètre de l'empreinte à l'aide d'une réglette spéciale ou d'un microscope à oculaire micrométrique; des tableaux à deux entrées permettent d'en déduire immédiatement le chiffre de Brinell d'après la charge d'essai et le diamètre de la bille.

Il est bon, pour plus de précision, de mesurer deux diamètres rectangulaires et de prendre la moyenne. On arrive ainsi à atteindre une précision de 1/100 de millimètre compatible avec les erreurs provenant des autres facteurs de l'essai.

d) *Machines de dureté.*

Les machines construites pour les essais à la bille affectent un très grand nombre de types; nous éliminerons de suite les appareils à ressorts ou à déformation qui produisent la pression par l'intermédiaire de ressorts que l'opérateur écrase, ou d'un bâti que l'opérateur déforme, et les appareils à choc qui laissent tomber d'une certaine hauteur la bille produisant l'empreinte; les premiers ont l'inconvénient de se dérégler facilement; quant aux autres, leurs résultats ne sont pas comparables à ceux obtenus par l'essai statique et leurs emplois sont limités.

Il reste alors trois modèles généraux de machines :

1° *Les appareils à levier* (type Bollée, les plus simples, indéréglables; ils se composent essentiellement d'un bâti (fig. 55) en un point duquel s'appuie verticalement de bas en haut, par l'intermédiaire d'un couteau, l'extrémité d'un levier; à l'autre bout du levier agissent les poids, par suspension également à couteau; au

(1) Pour les machines utilisant des manomètres, on peut aussi utiliser l'appareil Guillery de contrôle, décrit p. 108.

dixième de sa longueur le levier peut s'appuyer, toujours par couteau, sur le dispositif porte-bille se composant d'une tige verticale coulissant dans le bâti; la bille transmet ainsi à la pièce posée sur le bâti une pression égale à dix fois la charge effective. Une vis verticale manœuvrée par un volant ou par une presse hydraulique permet de libérer le fléau puis de le relever en fin d'essai. Il est naturellement tenu compte de la masse des différentes parties du

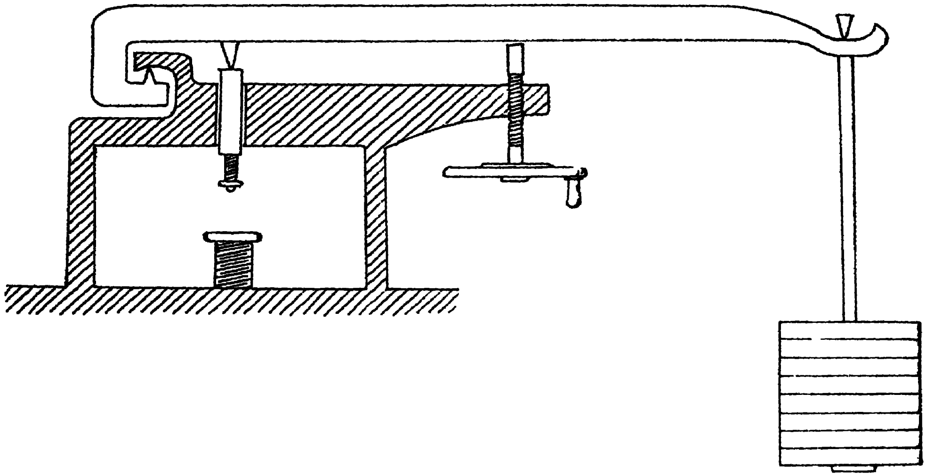


Fig. 55

Schéma de l'appareil à levier pour essais à la bille

fléau et des pièces d'attache pour la détermination réelle des poids que l'on fait agir au bout du fléau. Ces poids constitués par des rondelles entaillées, permettent d'obtenir par leur suppression totale ou partielle, des charges de 500, 1000, etc., jusqu'à 3.000 kg. La bille est fixée par une agrafe spéciale, la rendant très facilement interchangeable, au dispositif porte-bille qui comporte une vis permettant d'élever ou d'abaisser la bille. Enfin, l'enclume sur laquelle on pose la pièce, est elle-même reliée au bâti par une vis la rendant réglable en hauteur, de sorte qu'on peut très facilement amener la surface d'empreinte au contact de la bille, avant d'abaisser le fléau.

2° *Les appareils à pression hydraulique* (type Guillery, Aktiebolaget Alpha, Amsler) comportant un corps de presse fixe, l'extrémité de la tige du piston recevant le dispositif porte-bille; un

manomètre indique la pression et une enclume réglable en hauteur sert de support à la pièce à essayer.

M. Guillery a construit récemment sur ce principe une machine qui élimine l'influence de la vitesse et du temps de mise en charge

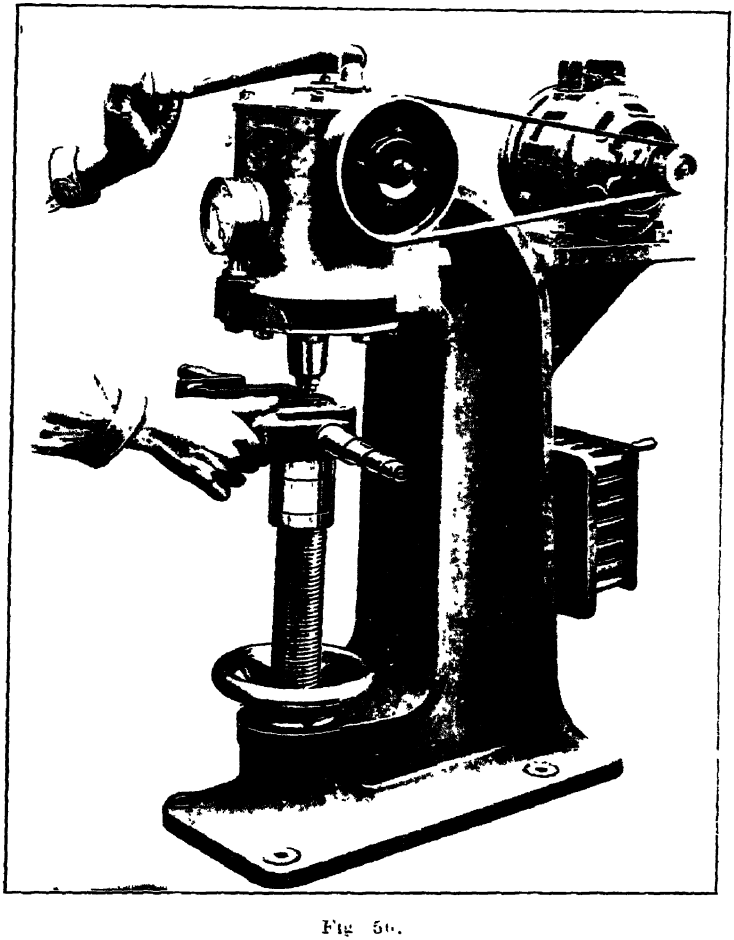


Fig. 56.
Machine de dureté Guillery à élimination de l'influence du temps.

(fig. 56); cette machine réalise un important perfectionnement puisqu'elle donne une comparabilité totale des résultats, par suppression des deux causes de variabilité de l'essai. Pour arriver à ce résultat, M. Guillery utilise une soupape qui règle la pression maximum d'après le débit, cette pression maximum étant d'autant plus

élevée que la vitesse d'ascension de la charge est plus rapide et l'essai étant arrêté dès que cette pression maximum est atteinte.

Supposons en effet que pour une vitesse déterminée de mise en charge, on arrête l'essai rigoureusement à 3.000 kg; le diamètre de l'empreinte D est trop faible d'une quantité d D; si l'on pousse l'effort à 3.000 + d P, on augmente le diamètre d'empreinte et on peut s'arranger de façon que cette augmentation soit justement égale à d D, en écrivant l'équation très sensiblement exacte :

$$\frac{3.000}{D^2} = \frac{3.000 + dP}{(D + dD)^2}$$

dD^2 étant négligeable, il vient :

$$dP = 2 \times \frac{dD}{D} \times 3.000$$

Par exemple, on a trouvé, avec un acier doux, une variation de diamètre d'empreinte de $4^{mm}74$ à $4^{mm}60$ lorsque la vitesse de mise en charge passait de 0 à 1.500 kg sec, l'essai étant arrêté rigoureusement au moment de l'arrivée à 3.000 kg.

On aura donc ici :

$$dP = 2 \times \frac{0{,}14}{4{,}74} \times 3.000 = 177 \text{ kg}$$

En montant la pression maxima à 3.177 kg et en arrêtant l'essai à cet instant, on aura donc l'empreinte exacte.

Le dispositif de soupape compensatrice, limitatrice de pression, imaginé par M. Guillery, donne automatiquement ce résultat et permet donc des essais extrêmement rapides et précis.

3° Enfin, la *méthode par comparaison* consiste à déterminer la dureté du métal en comparant les deux empreintes d'une bille de 10 mm, obtenues en même temps au moyen d'un même coup de marteau, dans la pièce à essayer et dans un cube de métal de dureté étalonnée.

L'appareil est un cylindre en aluminium (fig. 57) contenant un percuteur; dans un logement situé entre la base de ce percuteur et la bille, on place le cube étalon; on amène la bille au contact du métal à essayer et on donne un coup de marteau sur la tête du percuteur; on mesure les deux empreintes; une règle à calcul spé-

ciale donne directement la dureté cherchée en fonction de la dureté de l'étalon et des deux diamètres.

Cette méthode, moins précise que les précédentes, permet l'essai dans le cas où celles-ci sont impuissantes (pièces très lourdes, rails

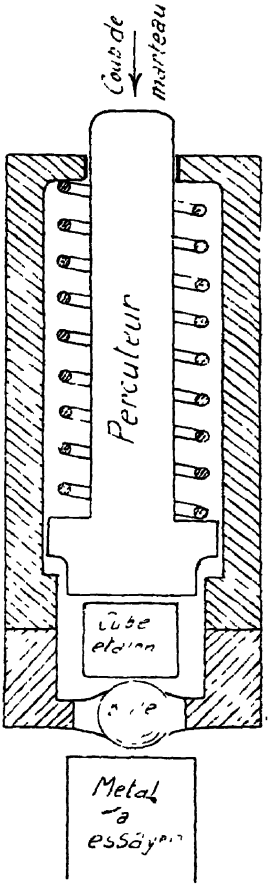


Fig. 57

Schéma de l'appareil Turpin

sur voies ferrées, etc., etc...); on peut également dans ce cas employer le procédé de dureté dynamique (appareil Guillery).

Appareils de mesure des empreintes. — Ces appareils sont, eux aussi, très divers.

La *réglette Le Châtelier* est une réglette en verre sur laquelle

sont gravés deux traits très légèrement inclinés l'un sur l'autre; on amène l'empreinte à être tangente aux deux traits, et on lit le diamètre en face du point de tangence sur une graduation tracée le long d'un des deux traits.

On utilise aussi les *microscopes* genre compte-fils, la graduation,

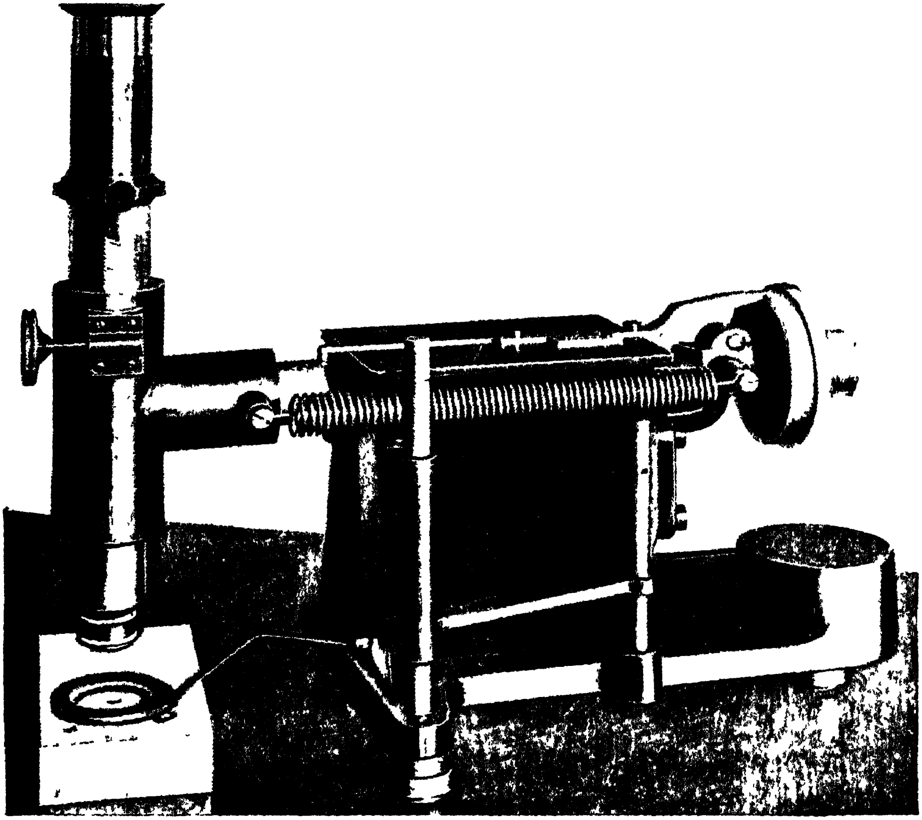


Fig. 58.
Microscope de mesure d'empreintes.

en 1/20 de millimètre étant gravée sur une des arêtes intérieures de la plaque de base.

Il existe également des microscopes ordinaires à oculaire comportant une division fixe en 1/20 ou 1/50 de millimètre.

Enfin, il y a lieu de signaler le *microscope à déplacement* donnant le 1/100 de millimètre (fig. 58); le tube microscopique vertical, peut se déplacer horizontalement par la manœuvre d'une vis mi-

crométrique; une division donne le millimètre, et le tambour de la vis le 1/100; le microscope comprend un fil de réticule perpendiculaire à la direction de déplacement; on amène ce fil à être tangent à l'un des bords de l'empreinte, on lit le nombre indiqué par les graduations, puis on déplace le microscope jusqu'à ce que le fil devienne tangent à l'autre bord; on fait une nouvelle lecture; la différence donne le diamètre de l'empreinte.

Cas particulier des très grandes duretés. — Dans le cas des très grandes duretés ($>$600 unités Brinell), la méthode de la bille tombe en défaut par suite de la déformation des billes; c'est ce qui arrive pour les cémentations et les trempes martensitiques.

On peut utiliser dans ce cas des appareils à pointe de diamant et on mesure soit le diamètre, soit la profondeur de l'empreinte (appareil de M. Pomey ou appareil Rockwell); mais le prix des appareillages est élevé et l'on se contente encore souvent en atelier de l'essai à la lime ou du rebondissement d'un marteau manié par un expérimentateur entraîné; ce sont là des sondages très aléatoires qui feront très vite place à une méthode pratique et scientifique de mesures, lorsque celle-ci existera.

§ 4 Essais de fragilité.

A. Appareils et éprouvettes :

a_1) *Expérimentation sur barreaux entaillés.*

Résilience. — L'absence de fragilité peut être décelée par des essais au choc exécutés à l'aide d'un appareil spécial :

Mouton-pendule de Charpy,

Mouton de Guillery,

Mouton de Frémont. etc...

sur éprouvettes entaillées, à savoir :

Grande éprouvette Charpy, ayant pour dimensions : 30 × 30 × 160, avec écartement des appuis de 120 mm, et entaille de 15 mm avec fond arrondi de 2 mm de rayon.

Petite éprouvette Charpy, où toutes ces grandeurs sont exactement divisées par 3 (fig. 59);

Éprouvette Mesnager, ayant pour dimensions : 10 × 10 × 55, avec entaille de 2 mm de largeur, 2 mm de profondeur et fond arrondi de 1 mm de rayon (fig. 60).

Éprouvette Frémont, ayant pour dimensions : 35 × 10 × 8, avec entaille carrée de 2 mm (fig. 61).

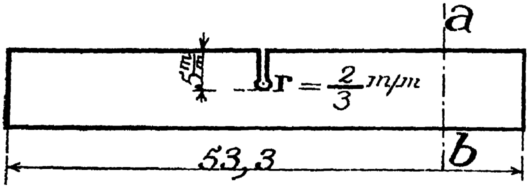


Fig. 59.
Éprouvette Charpy.

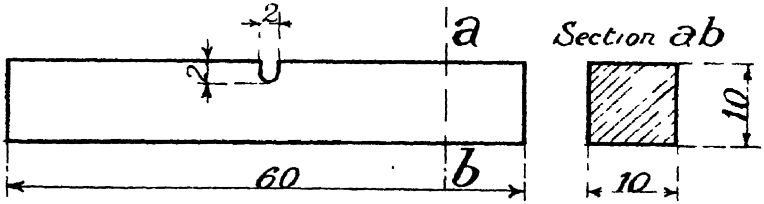


Fig. 60
Éprouvette Mesnager

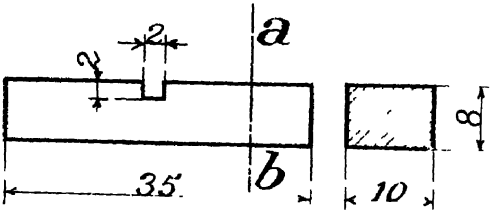


Fig 61.
Éprouvette Frémont.

Ces essais permettent de connaître le nombre de kilogrammètres nécessaires pour amener en un seul coup la rupture d'une de ces éprouvettes.

Le nombre de kilogrammètres trouvé, rapporté au centimètre carré de section, porte le nom de résilience.

C'est ainsi que le fascicule A_2 — 2 de la Commission permanente de standardisation, relatif aux cahiers des charges unifiés français fixe les résiliences suivantes pour les différentes nuances d'aciers au carbone :

« Pour chaque barreau essayé, le travail absorbé par la rupture,

exprimé en kilogrammètres par centimètre carré de la section réduite par l'entaille (résilience) sera au moins égal à la valeur fixée par le tableau suivant, d'après la résistance minimum imposée à l'essai de traction.

Résistance minimum	Résilience minimum
De 35 à 39 kg	10 kgm
De 40 à 47 kg	8 kgm
De 48 à 54 kg	6 kgm
De 55 à 65 kg	4 kgm
De 65 à 70 kg	2 kgm

a$_2$) *Expérimentation sur barreaux non entaillés.*

Les essais de choc sur éprouvettes non entaillées sont exécutés

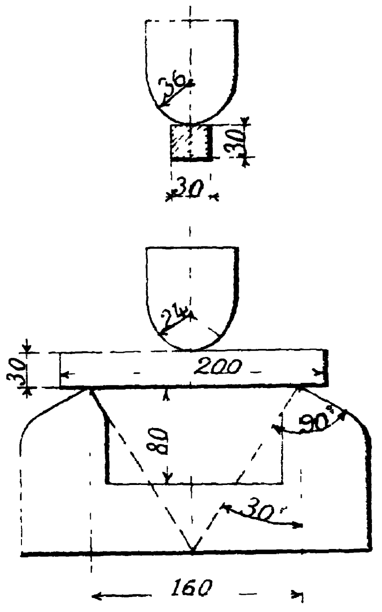


Fig. 62

sur des moutons de 18 kg pour barreau de 30 mm × 30 mm de section, ayant 200 mm de longueur; et de 12 kg pour barreau de 20 mm × 20 mm de section et pour barreau de fonte.

Les Cahiers des Charges unifiés français (fascicule A$_1$ — 1, 4 juin 1920) prévoient les dispositions suivantes :

Les couteaux, solidement fixés à la chabotte doivent avoir leur

arête parallèle au plan de guidage; le plan de ces arêtes doit être horizontal. Ces arêtes doivent avoir un arrondi de 2 mm de rayon. La chabotte doit posséder un poids égal à 10 fois celui du poids du mouton, et reposer sur un massif de maçonnerie de valeur au moins égale à 5 fois celui de la chabotte. (Voir fig. 62).

Pour chaque essai, il faudra déterminer la hauteur de chute du mouton et le nombre de coups de mouton que le métal devra supporter sans se rompre.

C'est ainsi que le fascicule A_2 — 2 de la Commission permanente de standardisation, relatif aux Cahiers des Charges unifiés français, donne les prescriptions suivantes, en ce qui concerne les aciers au carbone.

Les barreaux de 30 × 30 × 200 placés sur des appuis écartés de 160 mm doivent supporter sans se rompre 15 coups d'un mouton de 18 kilos, tombant d'une hauteur de 1^m 10.

On mesure aussi l'angle suivant lequel s'est produite la rupture, en rapprochant les deux fragments et amenant au contact les parties qui se sont rompues en dernier lieu.

B. — Similitude dans les barreaux de choc.

On se trouve en présence de plusieurs types d'appareils et de plusieurs types d'éprouvettes.

Les valeurs trouvées sont-elles indépendantes du type d'appareils et du type d'éprouvettes?

Pour des éprouvettes entaillées géométriquement semblables, comme le sont, par exemple, la grande et la petite éprouvette Charpy, trouve-t-on le même chiffre de résilience?

Pour des éprouvettes non entaillées et géométriquement semblables, quelles sont, les conditions à remplir pour obtenir des résultats comparables avec le même nombre de coups de mouton?

b_1) *Barreaux entaillés.* — Les travaux nécessaires pour briser l'un ou l'autre sont-ils proportionnels à une puissance des dimensions et, notamment, au carré des dimensions, c'est-à-dire aux sections?

Si les travaux consistent dans la séparation ou décollement des sections, ils seront proportionnels aux carrés des rapports de similitude :

$$\frac{T}{T^1} = a^2$$

Si les travaux consistent en déformations résultant d'effets de traction pour certaines zones et de compression pour d'autres, ils intéressent les volumes et l'on a :

$$\frac{T}{T^1} = a^3$$

A la première notion correspond la *fragilité structurale*.

A la deuxième notion correspond la *fragilité de masse*.

En réalité, on a presque toujours des effets de fragilité structurale et des effets de fragilité de masse.

Il y a déformation et rupture des sections. Quand on fait le rapport $\frac{T}{T^1}$, on ne trouve ni a^3, ni a^2, mais quelque chose d'intermédiaire entre a^3 et a^2.

Les travaux de rupture ne sont proportionnels, ni aux sections ni aux volumes, et, par conséquent, la résilience, telle qu'elle a été définie, ne constitue pas une caractéristique indépendante du type du barreau.

Conclusions. -- Des expériences très précises exécutées par MM. Charpy et Cornu, les conclusions suivantes ont été tirées :

« 1° Les appareils au choc de différents modèles (moutons verticaux, moutons-pendules, moutons rotatifs) et de différentes dimensions, employés par MM. Charpy et Cornu, donnent pour la résilience des résultats pratiquement identiques, à la condition d'uniformiser, sur chacun d'eux, la distance des appuis et les rayons des arrondis en contact avec le barreau, pendant l'essai.

« On a adopté, pour ces arrondis, un rayon égal à celui de la portion cylindrique de l'entaille ($r = 2$ mm pour les barreaux de 30 × 30 et 0,66 mm pour les barreaux de 10 × 10).

« On a reconnu qu'il convenait d'assurer à ces arrondis, un usinage et un entretien très soignés, pour éviter l'introduction de notables perturbations dans la régularité des expériences.

« Il n'est donc pas nécessaire, pour obtenir des résultats comparables, de fixer, *a priori*, un mouton type; il suffit de mettre en œuvre des appareils bien construits, bien gradués et dont les différentes grandeurs soient comprises dans les limites usuelles.

« La concordance des graduations de deux machines quelconques et la comparabilité, dans le temps, d'une machine avec elle-même, peuvent être chiffrées numériquement par une expérience de tarage,

se réduisant à un simple essai de flexion sans entaille et dont la réalisation, dans de bonnes conditions de régularité, est facile.

« 2° La valeur numérique de la résilience ne peut être énoncée que si l'on indique en même temps la forme et les dimensions du barreau et de l'entaille. On ne connaît pas encore de loi qui permette de déduire, l'une de l'autre, les résiliences mesurées, pour un même métal, sur des barreaux de dimensions différentes. »

Les conditions expérimentales définies d'après les Cahiers des Charges unifiés français, seront les suivantes en ce qui concerne les éprouvettes et les appareils :

Éprouvette U. F. — La loi de similitude n'étant pas applicable aux essais de résilience, il importe d'employer un type d'éprouvette unique si l'on veut avoir des résultats numériques comparables.

L'éprouvette U. F. est un barreau de 10 × 10 × 55 mm, entaillé à fond cylindrique de 1 mm de rayon et de 5 mm de profondeur. L'entaille peut être effectuée soit à la fraise, soit au foret, soit par rabotage; mais on devra vérifier soigneusement, dans tous les cas, le rayon du fond de l'entaille et s'assurer qu'il n'existe pas de stries parallèles aux génératrices de l'entaille.

Il est, en outre, recommandé d'ajouter aux chiffres donnant la résilience la mesure de l'*angle de rupture* déterminé en rapprochant les deux moitiés de l'éprouvette de façon à faire coïncider aussi exactement que possible les parties de la cassure provenant de la région opposée à l'entaille.

Enfin, comme pour tous les autres essais, une précaution essentielle consiste à bien spécifier le mode et le sens du prélèvement des éprouvettes.

Appareil d'essai. — Comme nous l'avons dit, le type de l'appareil d'essai employé n'a pas besoin d'être fixé pourvu que le principe de la mesure et l'exactitude de la graduation aient été préalablement vérifiés.

Toutefois, les Cahiers des Charges français exigent la réalisation des conditions suivantes :

« Le barreau reposera sur des appuis distants de 40 mm sur lesquels il devra être appliqué bien exactement avant de recevoir le choc.

« Les arrondis de ces appuis auront un rayon de 1 mm. Un dégagement conforme au croquis ci-contre (fig. 63), permettra de ré-

duire le frottement des extrémités et d éviter le coincement du barreau.

« Le couteau fixé au mouton aura une section triangulaire, l'angle

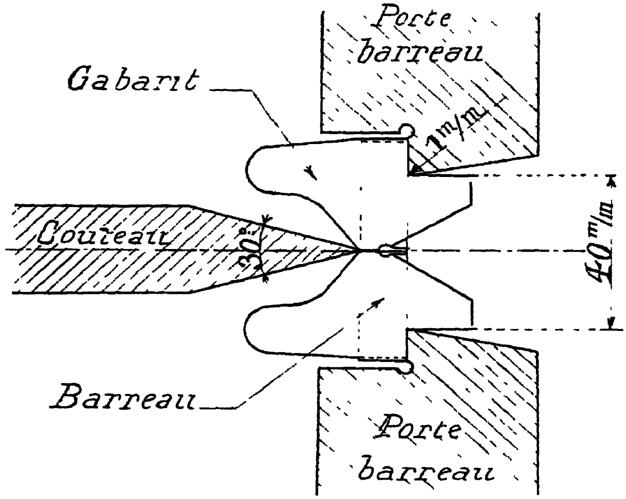


Fig 63

au sommet étant de 30° au maximum; l'arrondi de l'arête d'impact aura un rayon de 1 mm.

« Il est indispensable de vérifier très fréquemment avec un gabarit spécial l'écartement des appuis et de s'assurer que le couteau fixé au mouton est exactement au milieu de cette distance.

« La position du barreau sur les supports doit être aussi très soigneusement vérifiée à chaque essai, avec un gabarit spécial tenant compte de la position de l'entaille.

« La vitesse de choc ne doit pas être inférieure à $5^m 50$ par seconde.

« Sauf indications spéciales, la température doit être comprise entre 15° et 20°.

« L'influence de la température est beaucoup plus accentuée que dans les autres modes d'essais. »

b_2) *Barreaux non entaillés.* — On emploie de préférence des barreaux ayant comme dimensions : 30 × 30 × 200 mm.

Si l'on ne peut prélever des barreaux de 30 × 30, on pourra employer des barreaux de dimension réduite.

Les résultats seront comparables, avec le même nombre de coups de mouton, si les poids des moutons et les hauteurs de chute employées, sont déterminés de façon que les forces vives correspondant à chaque coup de moutons, sont proportionnelles aux volumes des barreaux et de plus satisfont à la condition suivante :

$$\frac{P}{P^1} = \frac{\sqrt{H}}{\sqrt{H^1}} = a$$

a étant le rapport de similitude,

P et P^1 le poids des moutons,

H et H^1 les hauteurs de chute.

Le fascicule A_1 — 1 de la Commission permanente de standardisation relatif aux Cahiers des Charges unifiés français, ajoute :

« L'influence du poids du mouton étant peu considérable ainsi que celle de la hauteur de chute, dans les limites usuelles, on pourra en pratique, employer un des moutons existant en déterminant la hauteur de chute et le nombre de coups de façon que la force vive totale soit la même que si l'on se conformait rigoureusement aux conditons fixées par la formule ci-dessus. »

Le barreau réduit de 10 × 20 × 150 mm, sera essayé sur appuis écartés de 120 mm au mouton de 18 kg, tombant de 1^m 10 de hauteur, alors que dans les conditions normales on utilise :

une éprouvette de 30 × 30 × 200 mm,

un écartement de couteaux de 160 mm,

et une hauteur de chute de 2^m 75.

C. — Description des machines d'essai

1° *Mouton vertical Frémont.* — Un poids de 10 à 15 kg peut, grâce à un dispositif de glissières verticales, tomber d'une hauteur de 4 m; ce poids est prolongé par un long couteau dont l'arrondi vient casser au point bas l'éprouvette de choc placée sur une plate-forme formant chabotte; après la rupture, le poids écrase des ressorts qui absorbent la force vive restante; cette dernière est mesurée par enregistrement de l'écrasement de ces ressorts (fig. 64 et 65).

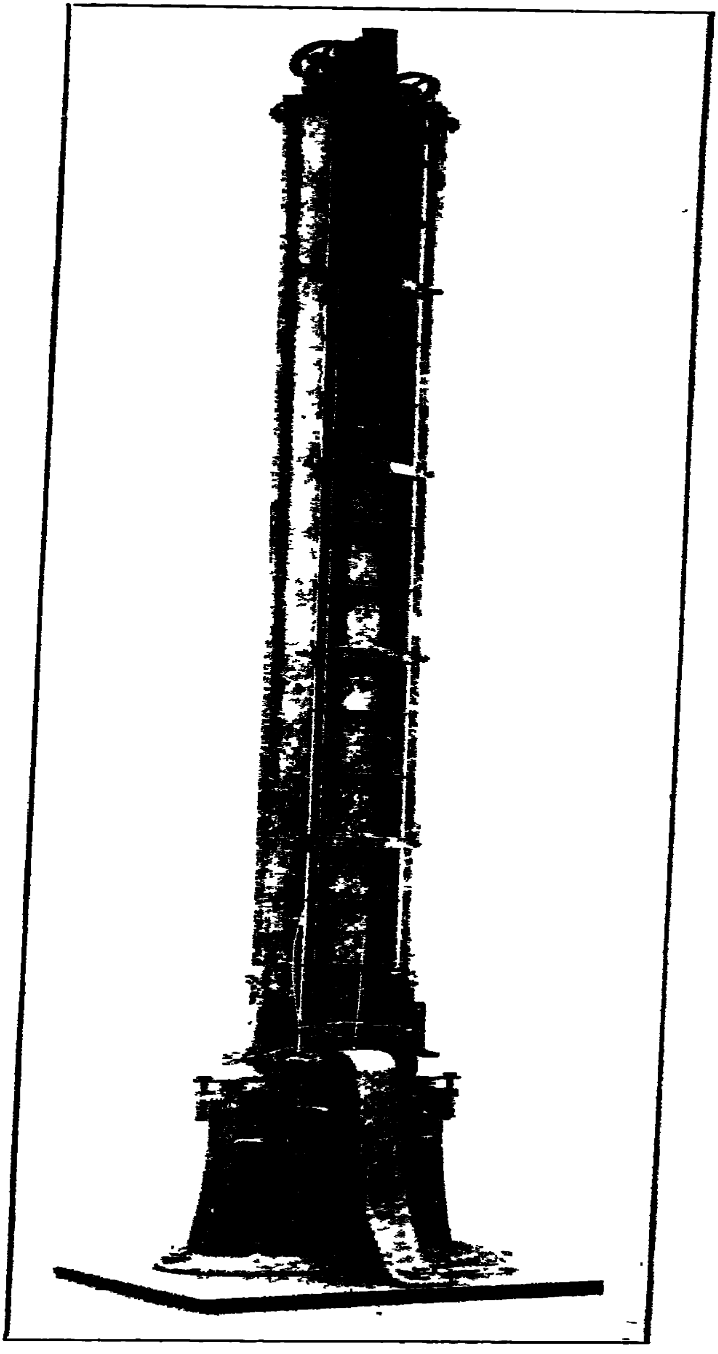


Fig. 64.
Mouton vertical Frémont

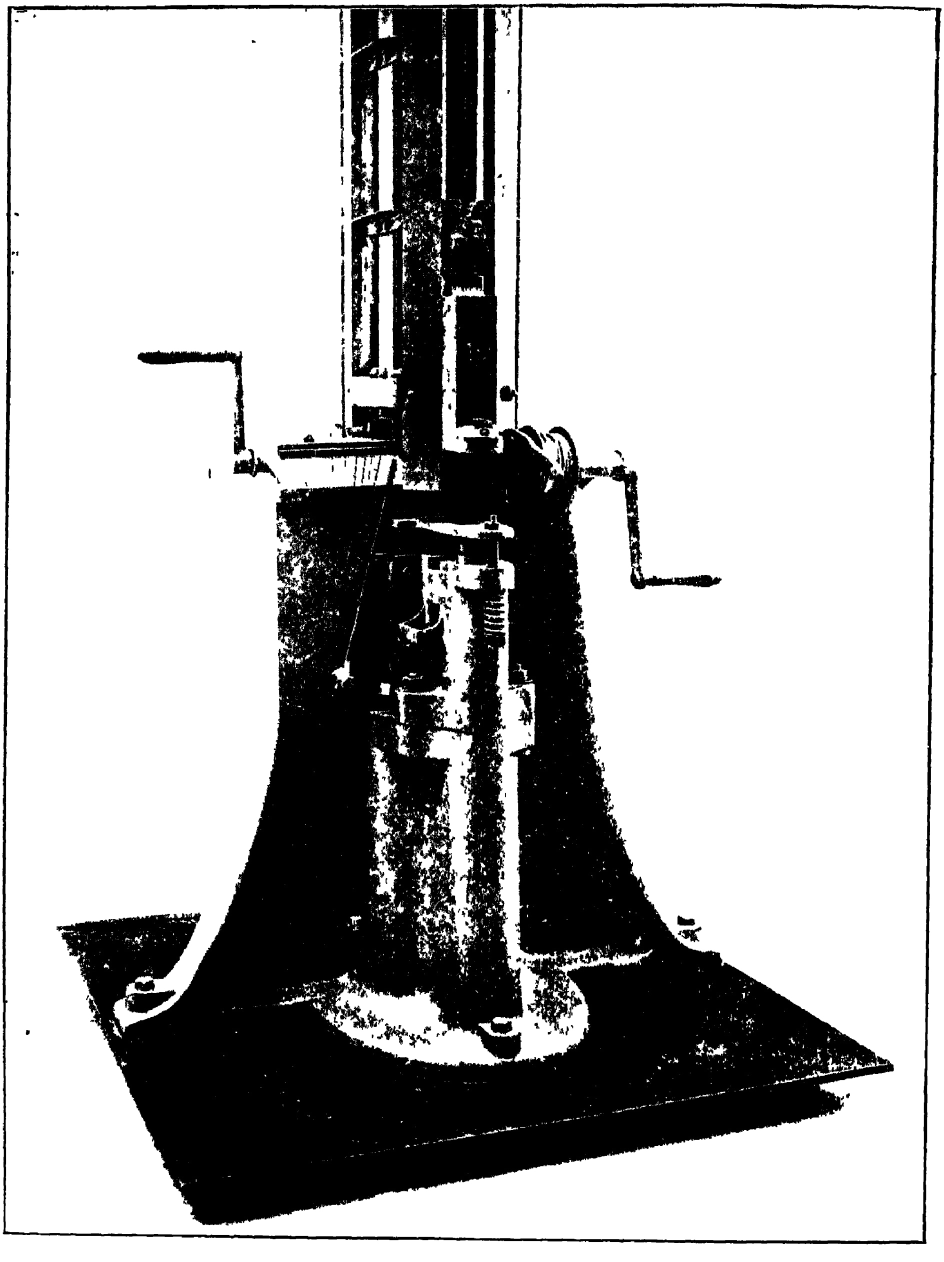


Fig. 65
Partie inférieure du mouton Frémond.

2° *Mouton-pendule Charpy.* — Ce mouton-pendule se compose d'une masse pesante M oscillant autour d'un axe O (fig. 66 à 68); cette masse, abandonnée à elle-même à partir d'une hauteur fixe H,

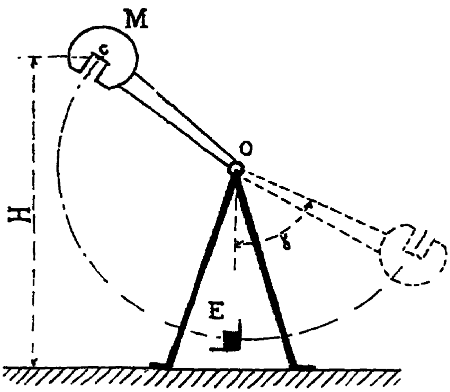


Fig. 66.
Schéma du mouton pendule Charpy.

brise l'éprouvette E au point bas de sa course et remonte à une hauteur qui est enregistrée automatiquement. Cet enregistrement est obtenu au moyen d'une aiguille serrée à frottement doux sur un axe placé dans le prolongement de l'axe d'oscillation du pendule. Pendant la remontée de la masse frappante, après rupture du barreau, l'aiguille est entraînée par un doigt solidaire du pendule; elle se déplace devant un cercle gradué et la division à laquelle elle s'arrête indique la hauteur maxima à laquelle le mouton est remonté.

Cet angle de remontée γ représente la force vive restante après rupture de l'éprouvette; un tableau de correspondance donne, à partir de cet angle, le nombre de kilogrammètres absorbés par la rupture de l'éprouvette; d'où la résilience en rapportant au centimètre carré. Le pendule est constitué par une pièce en acier forgé dans laquelle est rapporté un couteau *c*, en acier dur trempé. L'axe d'oscillation est monté sur roulement à billes. Il est supporté par les deux jambages d'un bâti dont la partie inférieure forme chabotte.

Sur ce bâti sont fixés solidement par des clavettes, les supports en acier forgé destinés à recevoir le barreau soumis à l'essai; leur

position peut être très facilement vérifiée et reréglée à l'aide du gabarit Standard (fig. 23).

Un bras, articulé au sommet des jambages, concentriquement à

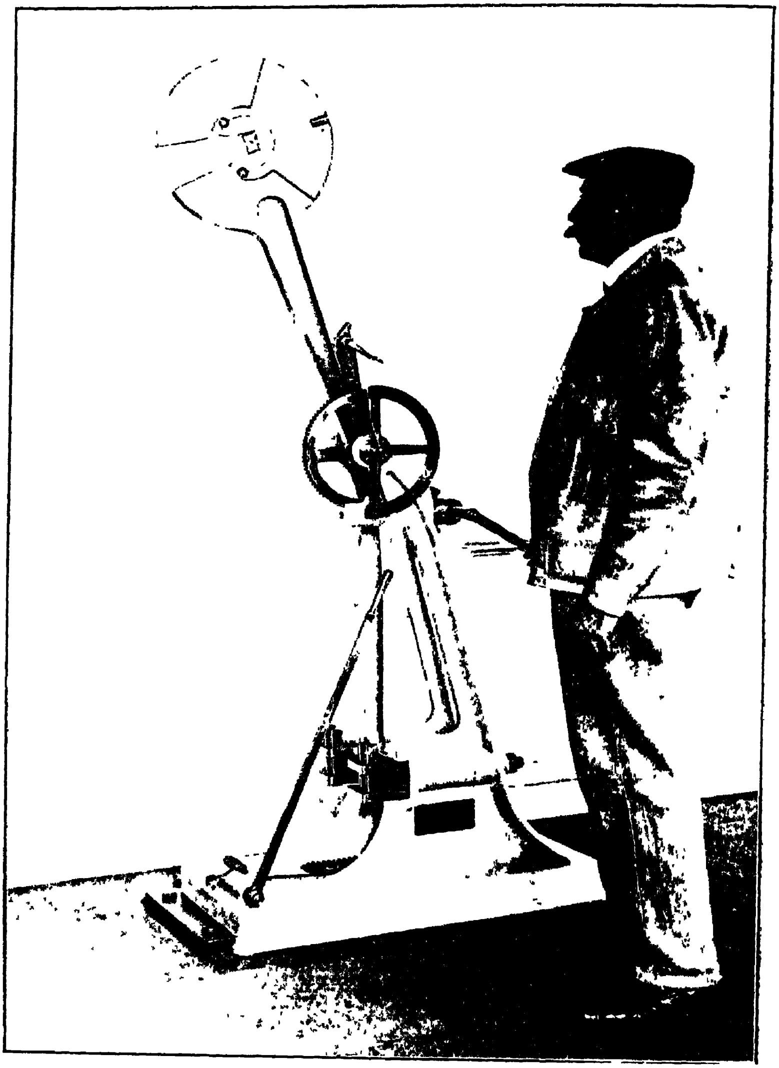


Fig 67.
Mouton-pendule Charpy, de 30 kgm.

l'axe d'oscillation, permet de relever le pendule à sa position de départ. Ce bras est muni d'un dispositif d'accrochage automatique.

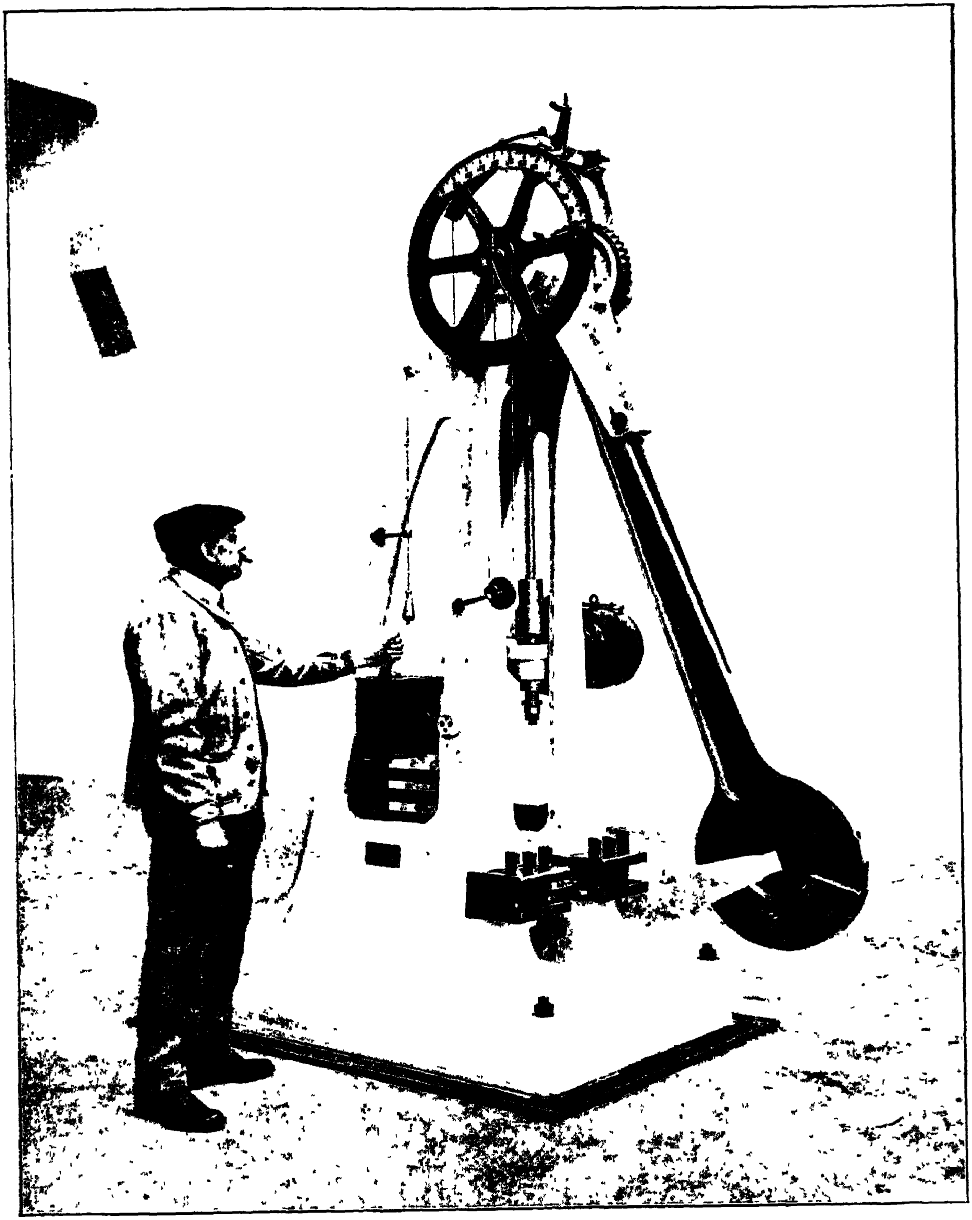


Fig. 68.
Mouton-pendule Charpy, de 300 kgm.

Il est commandé à la main par l'intermédiaire d'un jeu d'engrenages coniques et d'une roue à vis sans fin.

Une butée fixée au bâti, limite la hauteur de montée du pendule à la valeur correspondant à la puissance maxima de l'appareil, indiquée au tableau d'emploi.

La chute du pendule s'obtient en agissant à la main sur un petit levier solidaire du crochet porté par le bras de relevage.

Un frein à bande, disposé sur le socle du bâti et actionné à la

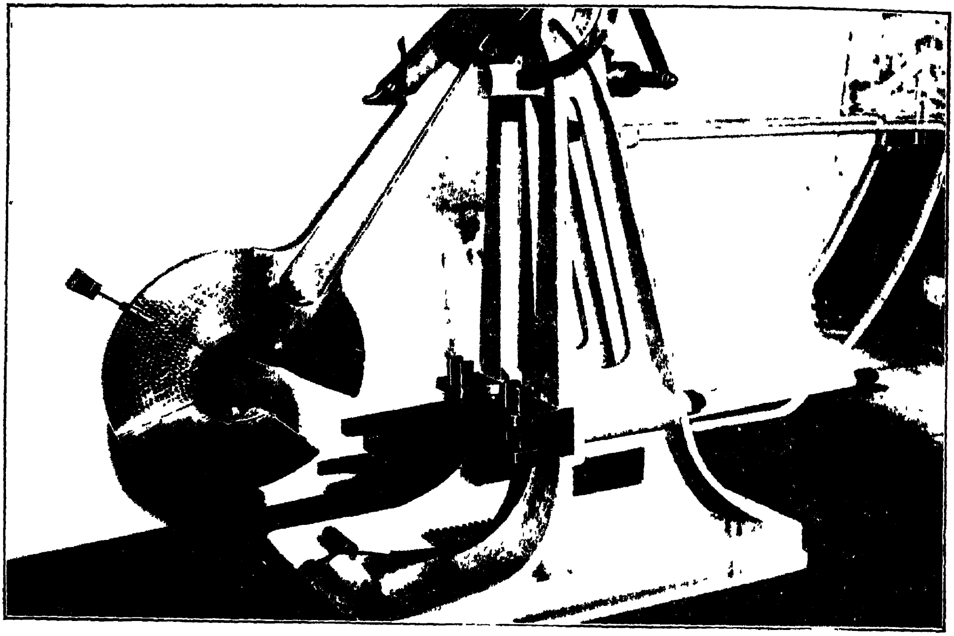


Fig. 69

main, permet d'arrêter l'oscillation du pendule après rupture du barreau.

Ce mouton permet également de faire des essais de traction par choc (fig. 69).

Il existe deux modèles correspondant à des puissances de 30 (fig. 67) et 300 kilogrammètres (fig. 68).

Il est bon de savoir déterminer soi-même les tableaux de correspondance; depuis l'emploi en grand des alliages légers, à résilience relativement faible, on a été, en effet, amené à utiliser des moutons à pendule plus légers que ceux des modèles ordinaires, de façon à obtenir un angle de remontée plus considérable et par

suite une précision plus grande; on a donc été obligé de refaire les calculs en conséquence; voici comment il faut opérer. La différence entre l'énergie disponible au moment du choc et l'énergie restante, après le choc, est égale au travail T absorbé par la rupture du barreau, augmenté dans le cas de l'essai de flexion par choc, du travail τ absorbé par la projection des fragments du barreau. (On considère comme négligeable, en raison du mode de construction de l'appareil, l'énergie absorbée par les appuis et le couteau).

L'énergie disponible au moment du choc est égale au produit du poids P de la masse frappante par la hauteur de chute du centre de gravité, diminué du travail t absorbé par les frottements mécaniques et la résistance de l'air à la descente.

L'énergie restante, après le choc, est égale au produit de P par la hauteur de remontée du centre de gravité, augmenté du travail t', absorbé par les frottements et la résistance de l'air à la remontée.

En désignant par α l'angle de départ, par α' l'angle de remontée et par d le rayon d'oscillation du centre de gravité on a donc :

$$P\,d\,(1 - \cos\alpha) - t - [P\,d\,(1 - \cos\alpha') + t'] = T + \tau$$

d'où :

$$T = P\,d\,(\cos\alpha' - \cos\alpha) - (t + t' + \tau)$$

Calcul de t et t' : Le pendule étant abandonné librement à sa position de départ, on note successivement tous les angles de remontée correspondant aux oscillations simples d'ordre impair, et on inscrit la valeur de leurs cosinus en regard de chacun des angles ainsi déterminés.

Soient α_{2n-1} et α_{2n+1}, les angles correspondant respectivement à la $(2n-1)^{eme}$ et à la $(2n+1)^{eme}$ oscillations simples : on admet que la différence $\cos\alpha_{2n+1} - \cos\alpha_{2n-1}$ représente la perte de hauteur h_{2n} du point situé à l'unité de distance de l'axe de suspension au cours de l'oscillation double correspondante.

Pour le même point, la perte de hauteur à la remontée ou à la descente (une demi-oscillation simple) est donc $\frac{h_{2n}}{4}$ et, pour le centre de gravité, cette perte de hauteur est égale à $d\,\frac{h_{2n}}{4}$.

On a donc :

$$t = P\, d\, \frac{h}{4}$$

et :

$$t' = P\, d\, \frac{h'}{4}$$

h correspondant à l'oscillation d'amplitude α, h' à l'oscillation d'amplitude α'.

Travail absorbé par la projection des fragments du barreau. — On admet que dans l'essai de flexion, les fragments de barreau sont animés, après la rupture, d'une vitesse V égale à la vitesse restante au milieu du couteau. La force vive absorbée par la projection est donc :

$$\tau = \frac{1}{2} \frac{p}{g} V^2$$

p étant le poids du barreau essayé.

On convient de faire abstraction, dans le calcul de ce terme correctif, du travail absorbé par les frottements. Dans ces conditions, si l'on appelle l la longueur du pendule simple synchrone, v la vitesse du point pesant à son passage par la verticale, avant sa remontée d'un angle α', et R la distance de l'axe d'oscillation au centre de l'impact, on peut écrire les relations :

$$V = v \frac{R}{l} \qquad\qquad v^2 = 2\, gl\, (1 - \cos \alpha')$$

d'où l'on tire :

$$\tau = p \frac{R^2}{l} (1 - \cos \alpha')$$

Or, par construction $\frac{R}{l}$ est très voisin de l'unité; on a donc :

$$\tau = p\, R\, (1 - \cos \alpha')$$

d'où la réalisation des tableaux de correspondance.

3. *Mouton rotatif Guillery.* — Cet appareil, très utilisé comme le précédent, est constitué par un disque métallique formant volant dont un tachymètre fait connaître la vitesse de rotation, donc la force vive.

L'éprouvette est cassée par un couteau à éclipses fixé en un point

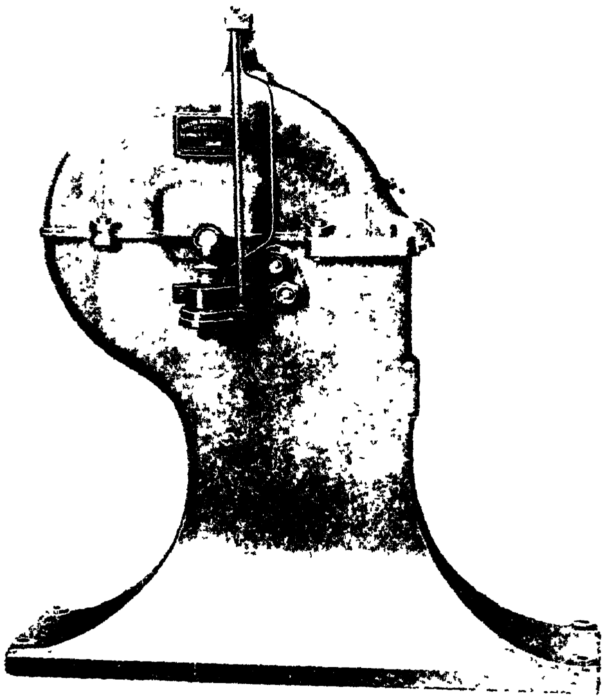


Fig. 70
Mouton rotatif Guillery de [illegible] kgm

de la périphérie du volant, couteau que l'on peut faire sortir à volonté du volant quand la vitesse de celui-ci est suffisante : la différence de lecture au tachymètre avant et après le choc donne la force vive absorbée par la rupture du barreau.

Il existe également deux types de mouton rotatif de puissances égales à 60 et 240 kgm.

§ 5. **Essais spéciaux.**

Ces essais ont pour effet de contrôler, d'une façon spéciale, la résistance du métal pour le genre de travail auquel il sera soumis dans son emploi.

A. *Essais de pliage.* — Cet essai est réglementé par le Cahier des Charges unifié français (fascicule A_1 — 1) à savoir :

Une bande de 250 mm de longueur minima, 40 mm de largeur et 20 mm d'épaisseur (ou d'épaisseur égale à celle du produit essayé, si celle-ci est inférieure à 20 mm), subit un premier pliage sur un empreint dont les faces obliques forment entre elles un angle de 60°. On applique sur le milieu de la bande un coin ou dégorgeoir arrondi suivant un rayon au plus égal à l'épaisseur de la bande et sur lequel on fait agir une presse ou un pilon, jusqu'à ce que la bande s'applique sur l'empreint. On enlève ensuite l'empreint et le coin, et on achève le pliage en amenant les faces, soit

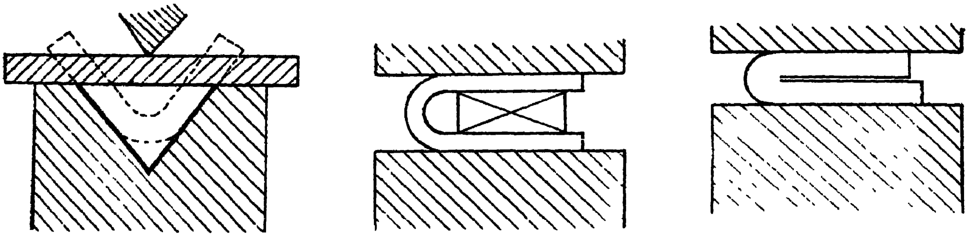


Fig. 71.

Pliage sur empreint à 60°. Pliage sur cale d'épaisseur donnée. Pliage à bloc.

à se toucher (pliage à bloc), soit à une distance déterminée par une cale que l'on place entre elles (voir fig. 71).

L'essai est considéré comme satisfaisant, si la face extérieure ne présente aucune déchirure. Cet essai peut être pratiqué soit à froid, soit à différentes températures. L'essai de forgeage pourra comporter deux pliages à bloc, l'un au rouge vif, l autre au rouge sombre.

L'essai de pliage est souvent effectué sur des bandes préalablement trempées dans des conditions déterminées pour s'assurer que le métal ne durcit pas, par la trempe, d'une façon exagérée.

On peut essayer au pliage des tiges cylindriques en acier, destinées par exemple, à la fabrication des boulons.

On se sert d'un étau, en encastrant la barre sur un tiers de sa longueur. Au moyen d'un tube creux qu'on engage dans la partie libre, on fait levier et l'on exerce lentement, à la main, les pliages prescrits, alternativement dans un sens ou dans l'autre.

Les mâchoires de l'étau sont munies de garnitures en cuivre,

présentant des arrondis d'un rayon égal au diamètre de l'éprouvette d'essai.

Ces essais sont utilisés pour les fils de haubannage dits « cordes à piano » des avions.

Le nombre de pliage à obtenir sans criques, ni rupture, est indiqué dans chaque Cahier des Charges.

Dans ces essais de pliage, il faut éviter les efforts dynamiques et exercer des efforts statiques, sans quoi les résultats sont faussés.

B. — *Essais de compression.* — Cet essai exige des barreaux très courts pour éviter les efforts de flambage.

Les phénomènes de compression sont moins faciles à observer que les phénomènes de traction.

On a cependant trouvé une certaine relation entre les résistances

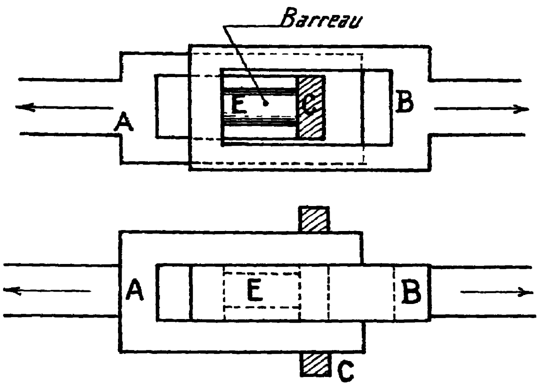


FIG. 72.
Dispositif de compression.

à la compression et les résistances à la traction qui se traduit comme suit :

$$\frac{\text{R. compression}}{\text{R. traction}} = 1 \text{ à } 2 \text{ pour les aciers doux et les fers.}$$

$$\frac{\text{R. compression}}{\text{R. traction}} = 4 \text{ environ, pour les fontes.}$$

Une fonte qui a une résistance de 15 kg à la traction, a une résistance d'environ 60 kg à la compression.

Les essais à la compression sont exécutés sur des presses à manomètres ou sur des machines de traction munies d'appareils de réversion (voir fig. 72).

C. — *Essais de flexion statique.* — Cet essai est particulièrement utilisé pour les fontes.

L'ancien appareil Monge est de moins en moins employé. On

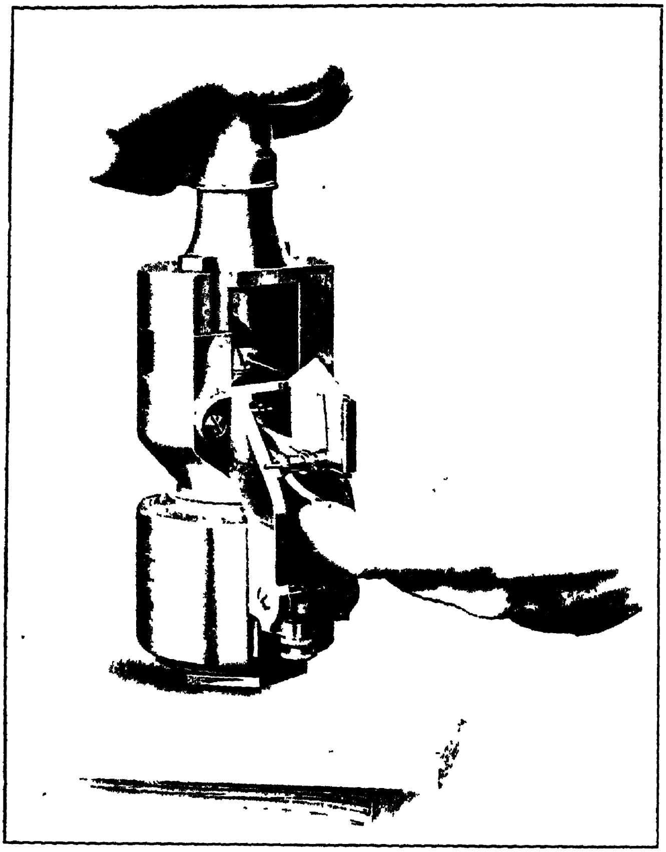


Fig. 73.

Dispositif Guillery d'essai des fontes à la flexion (s'adaptant sur la machine de dureté fig. 56)

peut utiliser la machine de Guillery qui permet d'effectuer sur fontes les essais de flexion, cisaillement et dureté; c'est une

simple presse à huile avec dispositifs d'adaptation spéciaux pour chacun de ces essais. (fig. 73).

La technique de l'essai de flexion statique pour les fontes peut être la suivante :

La fonte de chaque lot sera qualifiée au point de vue mécanique par l'essai de flexion sur barrettes cylindriques de 25 mm de diamètre et de 500 mm de longueur qui seront coulées en même temps que les pièces du lot (1).

Chaque éprouvette sera coulée avec une masselotte ayant au moins le même poids.

La coulée de ces barrettes sera faite en source et sans reprise, dans un moule en sable étuvé, placé verticalement.

Chaque éprouvette ne sera démoulée qu'après complet refroidissement (après deux heures de repos environ).

On essaiera l'éprouvette avec sa peau de moulage, après avoir convenablement nettoyé sa surface et ébarbé les joints du moule

Pour l'exécution de l'essai de flexion, l'éprouvette sera placée sur deux appuis cylindriques de 25 mm de rayon, dont les axes sont situés à 500 mm l'un de l'autre, et elle sera soumise en son milieu et jusqu'à rupture, à des charges lentement progressives, appliquées au moyen d'un couteau cylindrique de 25 mm de rayon. Le plan formé par les deux génératrices de l'éprouvette qui correspondent au plan de jonction des deux parties du moule sera disposé normalement à l'axe des efforts.

Connaissant la charge P correspondant à la rupture de la barrette, on évaluera l'effort R par millimètre carré de la fibre la plus tendue de cette éprouvette par la formule de la résistance des matériaux :

$$R = \frac{8 P L}{d^3} \quad (2)$$

dans laquelle P est la charge de rupture ci-dessus exprimée en kilos.

---

(1) On utilise aussi souvent l'éprouvette Fremont de 35 mm de longueur et de section 10 × 8 mm., posée sur appuis distants de 30 mm.

(2) Elle devient R = 0,0815 P. pour cette portée de 500 mm et pour une éprouvette ayant exactement 25 mm de diamètre.

L, l'écartement des appuis, exprimé en millimètres;

d, le diamètre de la section de la barrette, exprimé en millimètres.

Pendant l'essai, on mesure non seulement la charge P, mais aussi la flèche F prise par l'éprouvette au droit du couteau médian. Cette flèche sera mesurée au 1/4 de millimètre près, lors de la rupture. Pour les fontes, les essais devront fournir au minimum les résultats suivants :

Fonte pour cylindres, chemises et pistons de moteurs :

$$R = 40 \text{ kg}$$
$$F = 6 \text{ mm}$$

Fonte pour segments et autres pièces pour lesquelles il n'en est pas spécifié autrement :

$$R = 35 \text{ kg}$$
$$F = 5 \text{ mm}$$

D. — *Essais de torsion.* — Ces essais sont particulièrement utilisés pour les ressorts à boudin.

Pour ce genre d'épreuves, on utilise des essais de compression au-dessous de la limite élastique.

Ces efforts donnent lieu à des effets de torsion qu'on interprète individuellement.

E. — *Essais de poinçonnage et de cisaillement.* — Il n'y a pas de relation entre la résistance à la traction et la résistance au poinçonnage ou au cisaillement.

Les essais seront surtout des essais comparatifs.

On a essayé de pratiquer ces essais sur les machines-outils et les pièces elles-mêmes, en enregistrant les efforts et les déplacements.

C'est ainsi qu'il faut citer l'*élasticimètre Frémont*, permettant de construire des diagrammes de poinçonnage et de cisaillement, en fonction des efforts exercés, mesurés par la déformation du bâti de la machine, bâti élastique en col de cygne et des déplacements du porte-outils, déplacements mesurant la profondeur du poinçonnage.

L'essai de cisaillement est fréquemment effectué sur les fontes; on adopte les éprouvettes Frémont de 25 mm² de section, à sec-

tion circulaire ou carrée; on peut utiliser l'appareil de Guillery (fig. 74) déjà signalé pour la flexion statique.

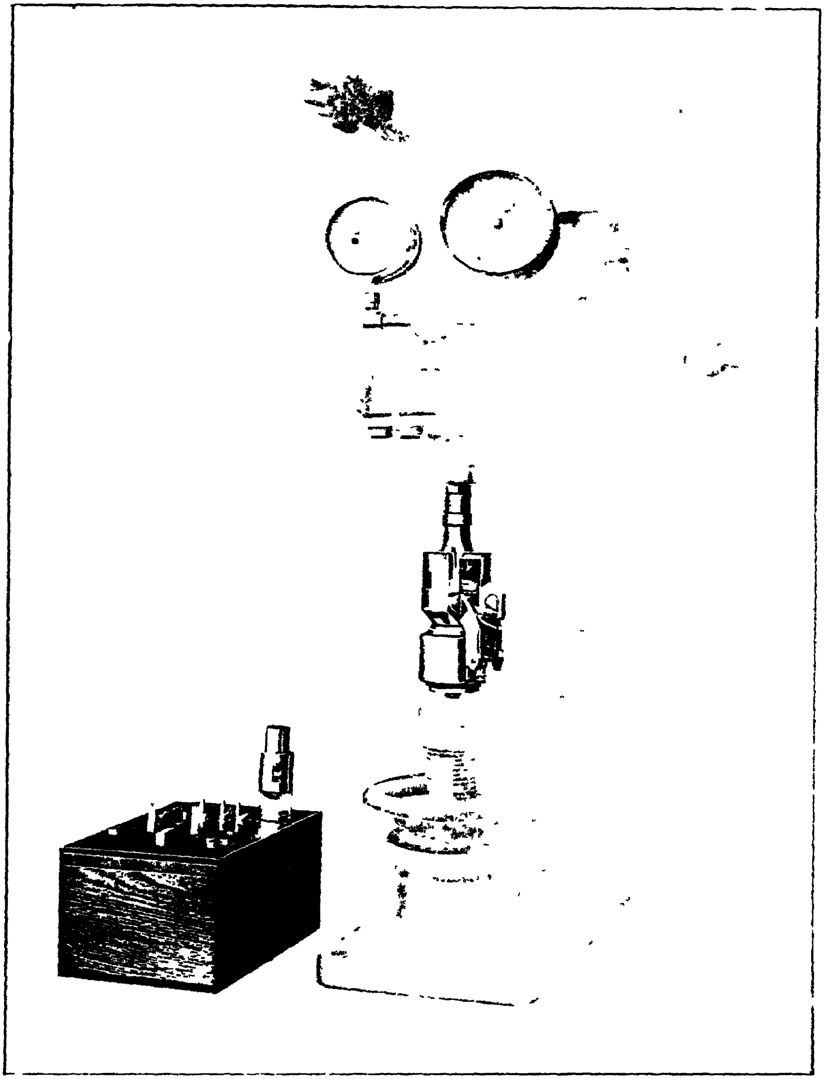
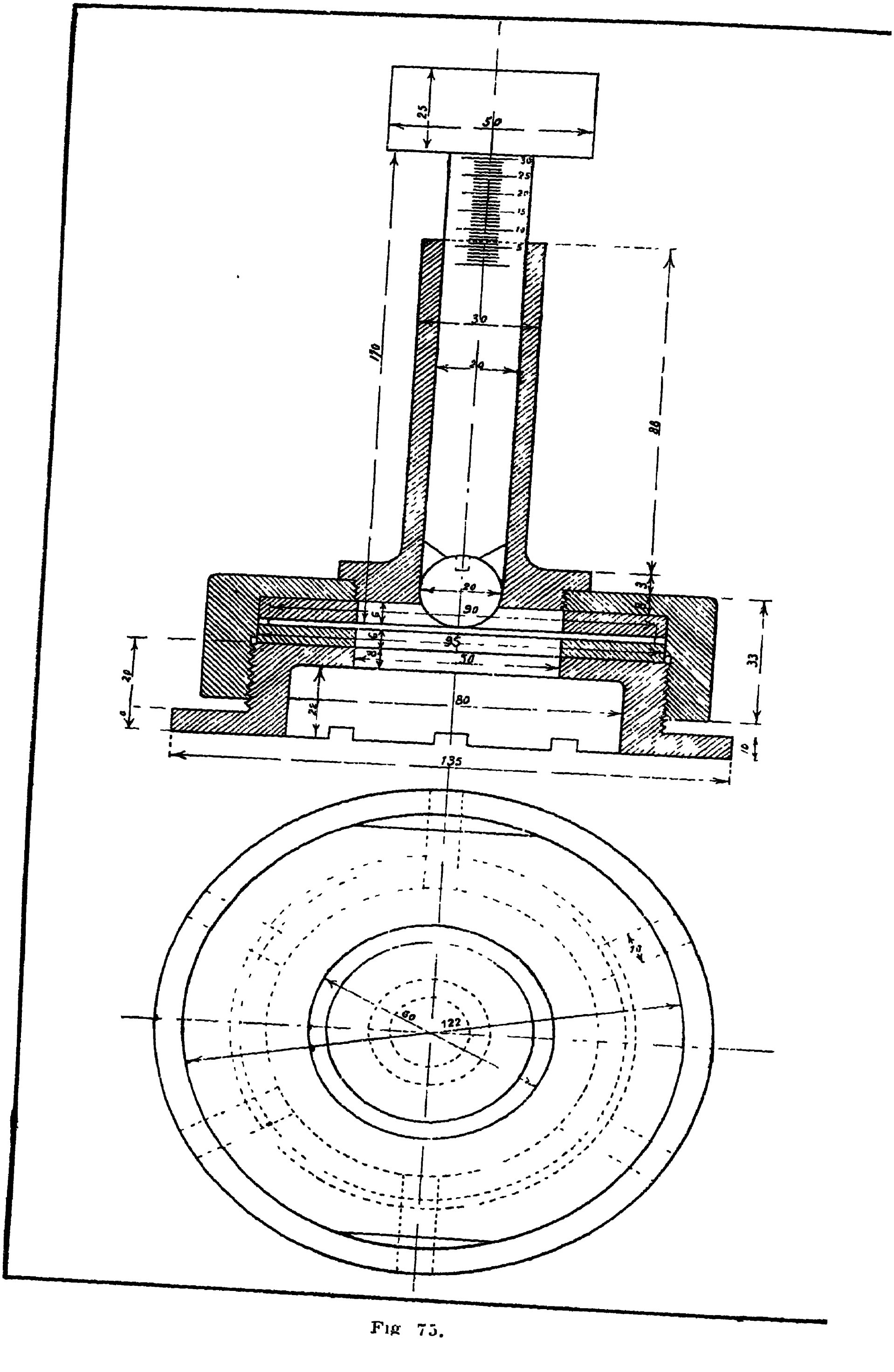


Fig. 74.
Machine Guillery pour l'essai des fontes au cisaillement.

F. — *Essais d'emboutissage.* — Pratiqués surtout sur les tôles



25
50
30
25
20
15
10
5
170
30
20
88
20
90
3
6
6
8
95
50
33
20
8
22
80
10
135
10
60
122

Fig 75.

(Voir fig. 75). Appareil Persoz, modifié au laboratoire de Chalais-Meudon.

Cet appareil se compose d'une tige graduée, munie à l'une de ses extrémités d'un plateau et à l'autre d'une bille.

Cette bille repose sur une rondelle de 90 mm de diamètre, pré-

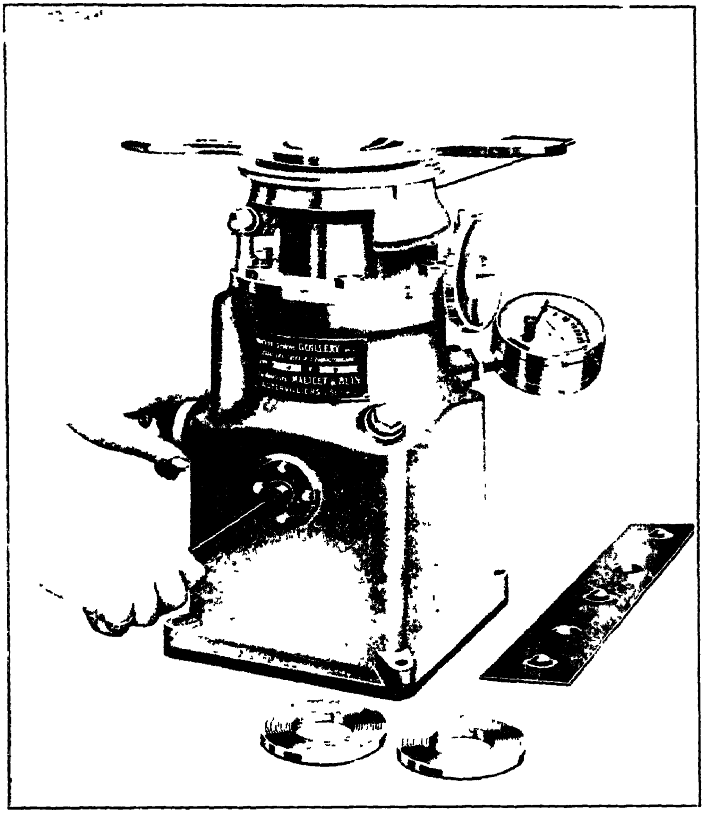


Fig. 76.

Machine d'emboutissage Guillery

levée dans la tôle à essayer, qui est serrée entre deux rondelles striées et alésées à 50 mm.

En soumettant l'ensemble de l'appareil à un effort de compression entre les deux plateaux d'une machine d essai, on peut appliquer au centre de la rondelle des charges croissantes et sans choc, par l'intermédiaire de la bille.

La compression est poussée jusqu'à rupture de la calotte qui se forme dans la tôle sous la pression de la bille.

On mesure ainsi la charge de rupture et la flèche.

Une nouvelle machine, due à M. Guillery, permet aussi l'exécution de ces essais d'emboutissage, et donne automatiquement la flèche et l'effort (fig. 76).

La méthode permet également d'apprécier l'adhérence de dépôts protecteurs contre la corrosion.

G. — *Essais d'usure.* — L'essai d'usure, ou de frottement, est extrêmement complexe quand on veut l'envisager dans toute sa généralité; il faut, en effet, faire intervenir un nombre très important de facteurs.

M. Jannin a réalisé une machine adaptée à l'étude des facteurs

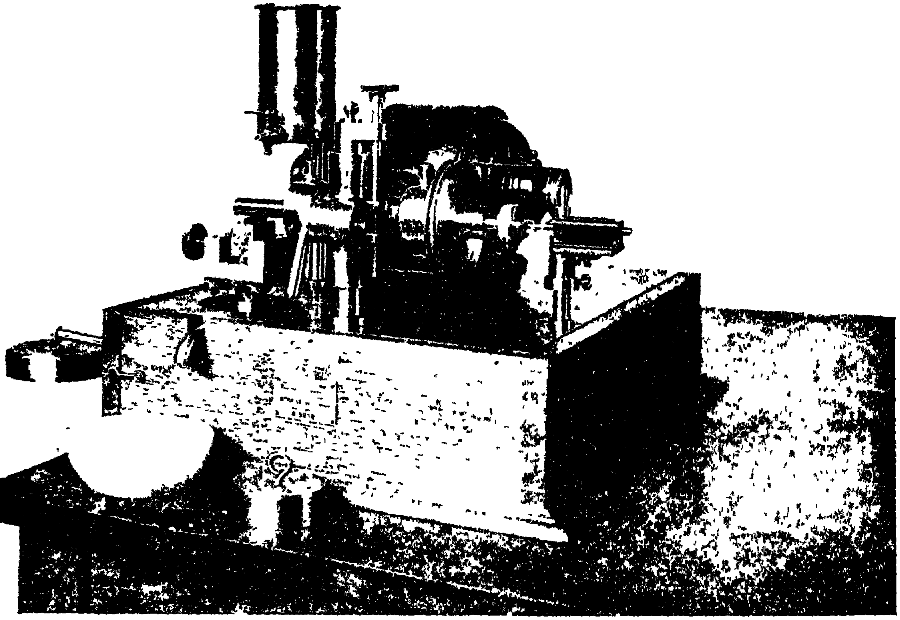


Fig. 77.
Machine d'usure Jannin.

les plus importants, et qui a déjà permis l'obtention d'intéressants résultats (fig. 77).

Le principe de l'appareil consiste à produire une empreinte d'usure en appliquant sous une pression constante une éprouvette

du métal à essayer sur un tourillon tournant à une vitesse donnée. La machine se compose d'une broche tournante horizontale, entraînée par un moteur électrique, à l'extrémité de laquelle on peut monter un tourillon; un compteur de tours est calé sur la broche. Une éprouvette cylindrique, de diamètre égal à celui du tourillon, est disposée horizontalement, sous celui-ci et perpendiculairement

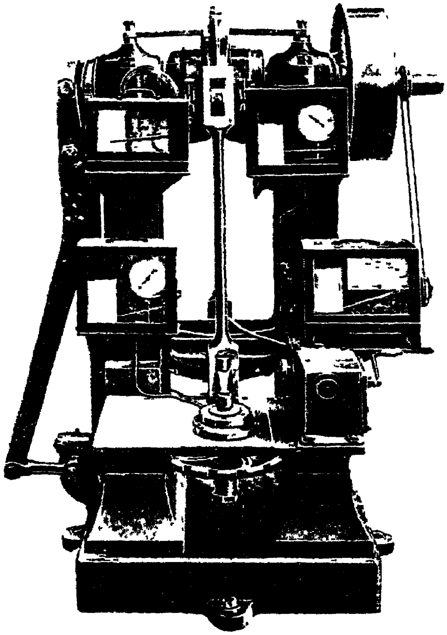


Fig. 78.
Machine d'usure Guillery.

à lui, dans un étau; un dispositif de levier avec contre-poids permet de déplacer verticalement l'étau et l'éprouvette pour appliquer celle-ci contre le tourillon, sous la pression voulue; une petite fontaine permet de lubréfier le tourillon.

La projection horizontale de l'empreinte est alors une courbe du quatrième degré qui se rapproche beaucoup d'un cercle; on mesure ses axes à l'aide du microscope ordinaire de dureté.

On étudie avec cette machine l'influence des facteurs suivants:
degré de poli du tourillon;
vitesse de rotation du tourillon;
temps d'usure;

pression de contact;
nature et traitements des métaux du tourillon et de l'éprouvette;
degré de lubrification.

Une machine, construite par M. Guillery pour la Compagnie des Chemins de fer de l'Est, permet en plus la détermination du coefficient de frottement et des températures d'échauffement (coussinets de locomotives); elle donne également des résultats intéressant la qualification des huiles de graissage.

H. — *Essai de texture.* — Le Cahier des Charges unifiés français (fascicule A_1 — 1) définit comme suit l'essai de texture :

L'essai de texture consiste dans l'examen d'une cassure pratiquée à l'extrémité d'une barre choisie par l'agent réceptionnaire, en vue de s'assurer s'il n'existe ni solution de continuité, ni inclusion de matières étrangères. La barre, entaillée par un procédé quelconque sur tout son pourtour, de manière à obtenir, dans la région centrale, une section de rupture égale à environ la moitié de la section primitive, doit être rompue brusquement en porte à faux soit au marteau, soit à la presse.

Pour les barres de grosses dimensions, afin d'éviter les difficultés de l'exécution de l'essai, la section de rupture sera limitée à 30 cm².

§ 6. Essais de durée.

Les essais de durée ont pour but d'étudier la résistance des métaux aux efforts variés, répétés, alternatifs et vibratoires.

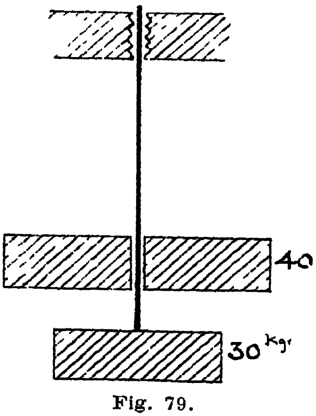


Fig. 79.

Expériences de Wöhler. — Elles se rattachent aux divers modes de déformation.

Par exemple, un fil de 1 mm^2 de section était soumis successivement à des tractions de 70 kg, 30 kg, etc., durant chacun un dixième de seconde (Voir fig. 79).

Résumons les résultats :

1° *Cas de l'effort minimum constant.* — Plus l'effort maximum est faible, plus le nombre de répétitions pour obtenir la rupture est grand. Exemple :

EFFORT minimum	EFFORT maximum	NOMBRE de répétitions
30 kg	22 kg	> 48 000 000
30	30	860 000
30	40	170 000

2° *Cas de l'effort maximum constant.* — Plus l'effort minimum est grand, plus le nombre de répétitions pour obtenir la rupture est grand. Exemple :

EFFORT minimum	EFFORT maximum	NOMBRE de répétitions
12 kg	73 kg	60 000
36	73	400 000
48	73	6 000 000

3° *Cas de l'effort minimum et maximum variables.* — Si l'on fait varier l'effort minimum et l'effort maximum, on constate que l'effort maximum au-dessous duquel il n'y a jamais rupture est d'autant plus élevé que l'effort minimum est plus grand.

Charge limite maximum. — Pour les fers et les aciers expérimentés par Wohler, la charge maximum est représentée par :

$$R' = \frac{\Delta}{2} + \sqrt{R\,(R - n\,\Delta)}$$

R = résistance à la rupture,

Δ = différence entre la charge maximum et la charge minimum,
n = coefficient qui dépend du métal (1,42 pour le fer, 1,66 pour l'acier demi-dur).

D'après les expériences de Wöhler, on peut avoir des valeurs de R′ inférieures à la limite élastique.

Mais est-on sûr de n'avoir pas dépassé la limite élastique?

Expériences de M. Boudouard. — M. Boudouard a appliqué la méthode de l'amortissement des mouvements vibratoires imaginée par M. Guillet, secrétaire de la Faculté des Sciences de l'Université de Paris.

M. Boudouard a fait vibrer des tiges de métal de 1 cm de largeur sur 5 dixièmes de millimètre d'épaisseur, encastrées par une de leurs extrémités dans un étau solidement fixé à une table faisant corps elle-même avec les murs du bâtiment.

Cette installation était montée au Collège de France.

Le courant était fourni par quatre accumulateurs.

Les vibrations étaient entretenues par un électro-aimant.

Un interrupteur placé dans le circuit permettait de cesser l'excitation de l'électro-aimant, au moment où l'on voulait étudier l'amortissement du mouvement vibratoire du métal expérimenté.

Métaux étudiés :

1° Fer puddlé (recuit à 950° et refroidi à l'air).
2° Acier extra-doux (recuit à 950° et refroidi à l'air).

3° Acier à 0,3 de carbone .	Recuit à 900° puis refroidi à l'air, Trempé.
4° Acier à 0,6 de carbone .	Recuit à 850° puis 650°; refroidi à l'air. Trempé, chauffé à 850° et refroidi à l'eau froide à 15°.
5° Acier à 1 de carbone . . .	Recuit à 850° puis à 650° et refroidi à l'air. Trempé, chauffé à 850° et trempé dans l'eau froide à 15°. Trempé et revenu, chauffé à 850°; Trempé dans l'huile à 15° et revenu à 350° à l'abri de l'air.

Résultats : 1° Après des durées variables, tous les barreaux se sont rompus.

2° Le nombre de vibrations nécessaires pour amener la rupture varie en raison inverse de la teneur en carbone pour les aciers demi-durs et durs étudiés.

3° La trempe a une grande influence sur la résistance au mouvement vibratoire pour les aciers à teneur moyenne et haute teneur en carbone.

La trempe sèche de ces aciers est à proscrire absolument.

Elle amène infailliblement la rupture, par fragilité.

Machines d'essais :

Il existe trois machines spécialement construites pour les essais de durée, ce sont : la machine de Wöhler, pour les essais aux flexions

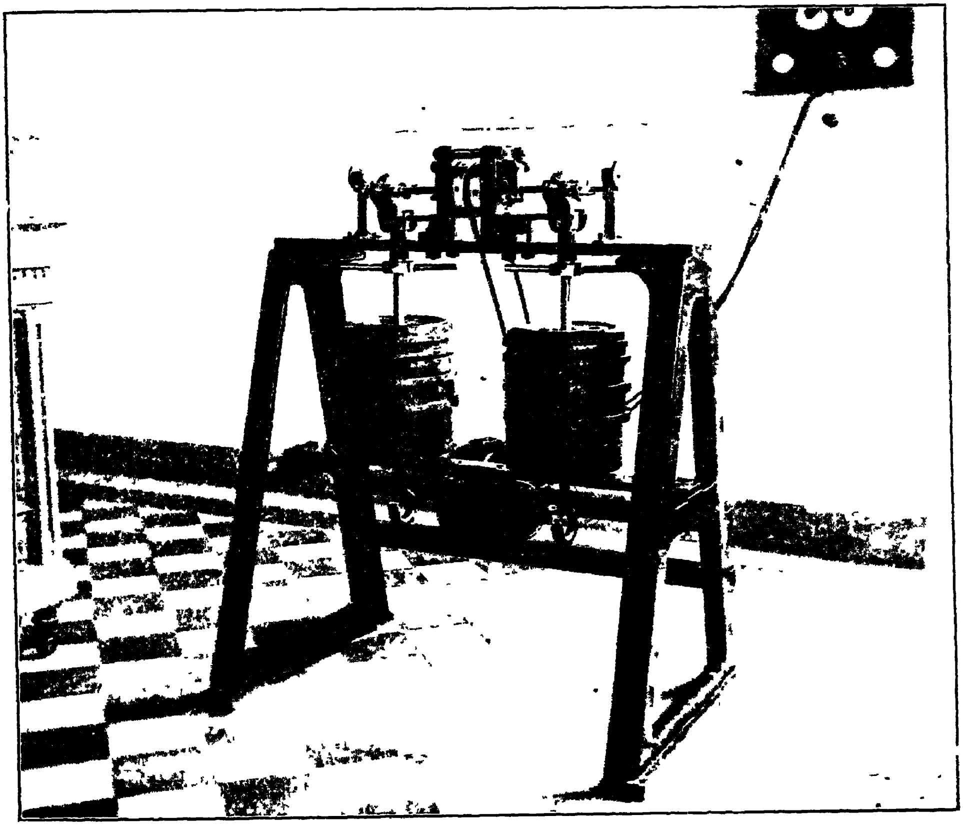


Fig. 80.
Machine de Wöhler, aux flexions répétées

répétées; la machine de Cambridge pour les essais aux chocs répétés; la machine de Jannin pour les essais aux vibrations.

Machine de Wöhler. — Une longue éprouvette cylindrique, maintenue horizontalement par sa partie médiane, et chargée à ses extrémités, est soumise à un mouvement de rotation très rapide; un compteur enregistre le nombre de tours nécessaires à la rupture (fig. 80). Les résultats obtenus jusqu'à présent n'ont pas été très nets.

Machine de Cambridge. — Une éprouvette cylindrique entaillée dans sa partie médiane sur toute la périphérie d'une section droite, est disposée horizontalement; un marteau dont on peut faire varier la masse, tombant d'une hauteur également variable, frappe périodiquement (moyenne 60 coups à la minute) la région entaillée; à chaque coup l'éprouvette tourne d'un quart de tour; un compteur donne le nombre de coups nécessaire à la rupture (fig. 81).

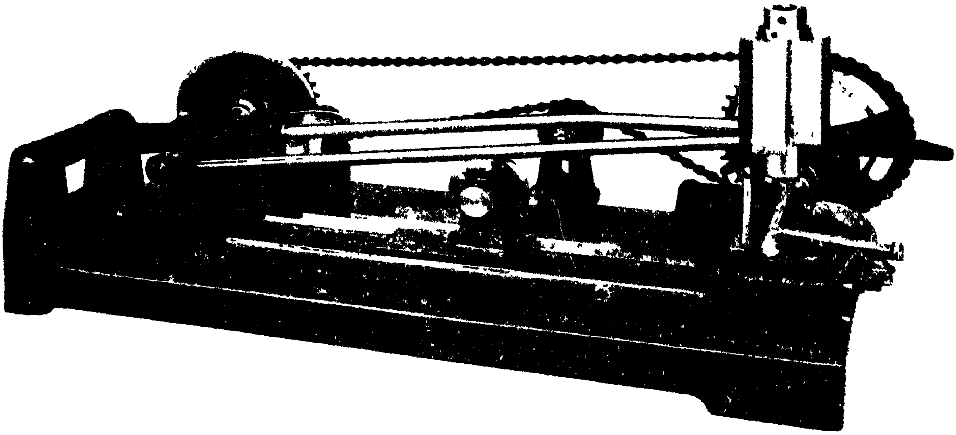


FIG. 81
Machine de Cambridge, aux chocs répétés.

Ici, les résultats obtenus ne manquent pas d'intérêt :a l résistance aux chocs répétés varie avec les traitements dans le sens de la limite élastique. La limite élastique joue donc un rôle primordial dans la résistance à une sollicitation. Il est simplement demandé à la résilience de rester supérieure à un certain minimum de 8 à 10 kgm-cm². Ce minimum de résilience étant respecté, la recherche d'une limite élastique aussi élevée que possible s'impose pour la

Machine Jannin. — Nous donnons ci-après les résultats des expériences faites par M. Jannin avec la machine dont nous donnons la description ci-après (1) :

Supposons une pièce soumise à une tension constante R.

Si nous traçons la courbe des tensions en fonction du temps, nous avons une ligne droite (fig. 82) A B parallèle à l'axe O X.

Si la pièce est soumise, en plus de sa tension, à un régime vibra-

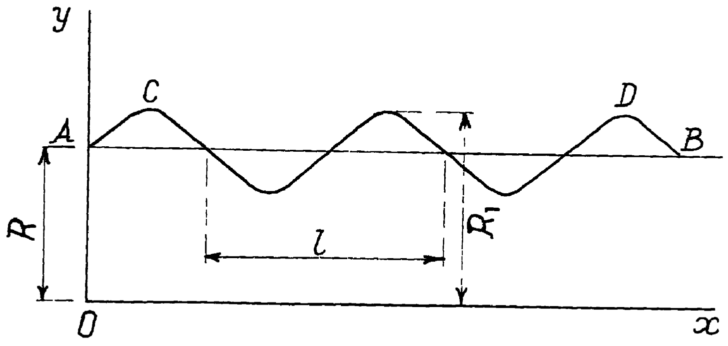


Fig. 82.

toire, la courbe représentative sera une branche de sinussoïde, la longueur l représentant le temps d'une vibration. Si la tension

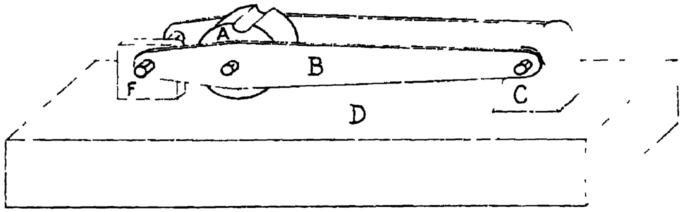


Fig. 83.
Schéma de la machine d'essai aux vibrations.

maxima dépasse la limite élastique d'endurance, la pièce se rompra au bout d'un certain temps.

La machine d'essais vibratoires de M. Jannin (fig. 83) se compose d'un volant déséquilibré A, monté à roulement à billes sur un levier B (constitué par 2 flasques en tôle) oscillant autour d'un point fixe C, supporté par le bâti D.

(1) Communication faite par M. Jannin, le 5 décembre 1924, à l'Association franco-belge pour l'Essai des Matériaux 32 P. V. 1924.

L'extrémité des deux flasques du levier B opposée au point fixe est percée d'un trou de 10 mm dans lequel on peut introduire l'éprouvette du métal à essayer, éprouvette constituée par un cylindre de 10 mm de diamètre sur 100 mm de longueur.

Entre les deux flasques du levier, se trouve fixé au bâti D de la machine, un support F qui permet d'immobiliser l'éprouvette en son milieu.

Un petit moteur électrique permet de donner un mouvement de rotation très rapide au volant déséquilibré A.

Ce mouvement a pour effet de soumettre l'éprouvette à un régime de vibrations de flexion très intense puisque ses deux extrémités sont solidaires du volant déséquilibré et que son milieu est solidaire du bâti fixe.

Les efforts que supporte l'éprouvette, et qui changent de sens à chaque demi-rotation, sont fonction des conditions d'établissement de la machine, savoir :

Le poids du volant;

Le moment de déséquilibre de ce volant;

La longueur et le poids du levier;

Le poids du bâti;

La vitesse de rotation de la machine;

L'élasticité des diverses pièces composant la machine, etc...

Les deux principaux facteurs sont le moment de déséquilibre et la vitesse de rotation de la machine.

Ces deux données permettent de calculer d'une façon approximative les efforts supportés par l'éprouvette.

L'essai de résistance aux vibrations se fait de la façon suivante :

L'éprouvette est introduite dans les trous de l'extrémité du levier, puis fixée en son milieu sur le support attenant au bâti; le moteur électrique est mis en marche et on note le temps au bout duquel se produit la rupture de l'éprouvette.

Il est évident que plus l'éprouvette résistera longtemps, plus sa résistance aux vibrations sera grande.

Les résultats expérimentaux obtenus par M. Jannin conduisent aux conclusions suivantes :

Conclusions. — 1° La résistance des métaux aux vibrations croît avec la limite élastique du métal. Elle dépend également de sa forme structurale, les structures à petits cristaux résistant beau-

coup mieux à limite élastique égale, que les structures à gros cristaux. Pour les aciers, l'état qui convient le mieux est l'état sorbitique, c'est-à-dire celui obtenu par une trempe suivie d'un revenu.

2° La résistance des métaux aux vibrations croît également avec la pureté et l'homogénéité du métal. Au sujet des aciers, il y a donc un grand intérêt à avoir des produits aussi purs que possible et à les employer suffisamment corroyés.

3° La résistance des métaux aux vibrations diminue lorsque le jeu augmente dans les organes de la machine. Dans les machines où les organes sont soumis à des vibrations, il est donc nécessaire de monter ces derniers avec le minimum de jeu nécessaire à leur fonctionnement. Il faut également que les pièces qui les composent soient établies dans des conditions telles que le jeu prévu ne puisse pas augmenter d'une façon sensible par usure.

4° La résistance des pièces d'un organe soumis à des vibrations diminue lorsque la vitesse de la machine augmente. Lorsqu'on augmentera la vitesse d'une machine, il faudra donc — pour rester dans les mêmes conditions de sécurité — chercher soit à réduire les causes produisant les vibrations par un meilleur équilibrage, soit à augmenter la résistance des pièces en les prévoyant en un métal plus résistant aux vibrations.

5° La présence des angles vifs aux changements de section favorise la rupture des pièces soumises aux vibrations.

6° La propagation de la fissure est plus rapide dans un acier dur que dans un acier doux.

Autrement dit, dans un acier doux à haute résilience, la fissure se propage lentement depuis l'apparition de la première crique jusqu'au centre; tandis que dans l'acier dur à faible résilience la pièce casse très rapidement après l'apparition de la première crique, et dans l'aspect de la cassure, on ne voit pas la progression de la fissure comme dans le premier cas.

La limite élastique élevée retarde l'apparition de la première crique. Une haute résilience conjuguée avec cette haute limite élastique constitue un grand élément retardateur de la propagation.

Dans certains cas, il sera même possible, par un examen de la pièce, de déceler la fissure avant la rupture. On pourra donc ainsi changer la pièce et éviter un accident, ce qui ne serait pas possible avec un acier à faible résilience qui casse par fragilité dès l'apparition de la première crique.

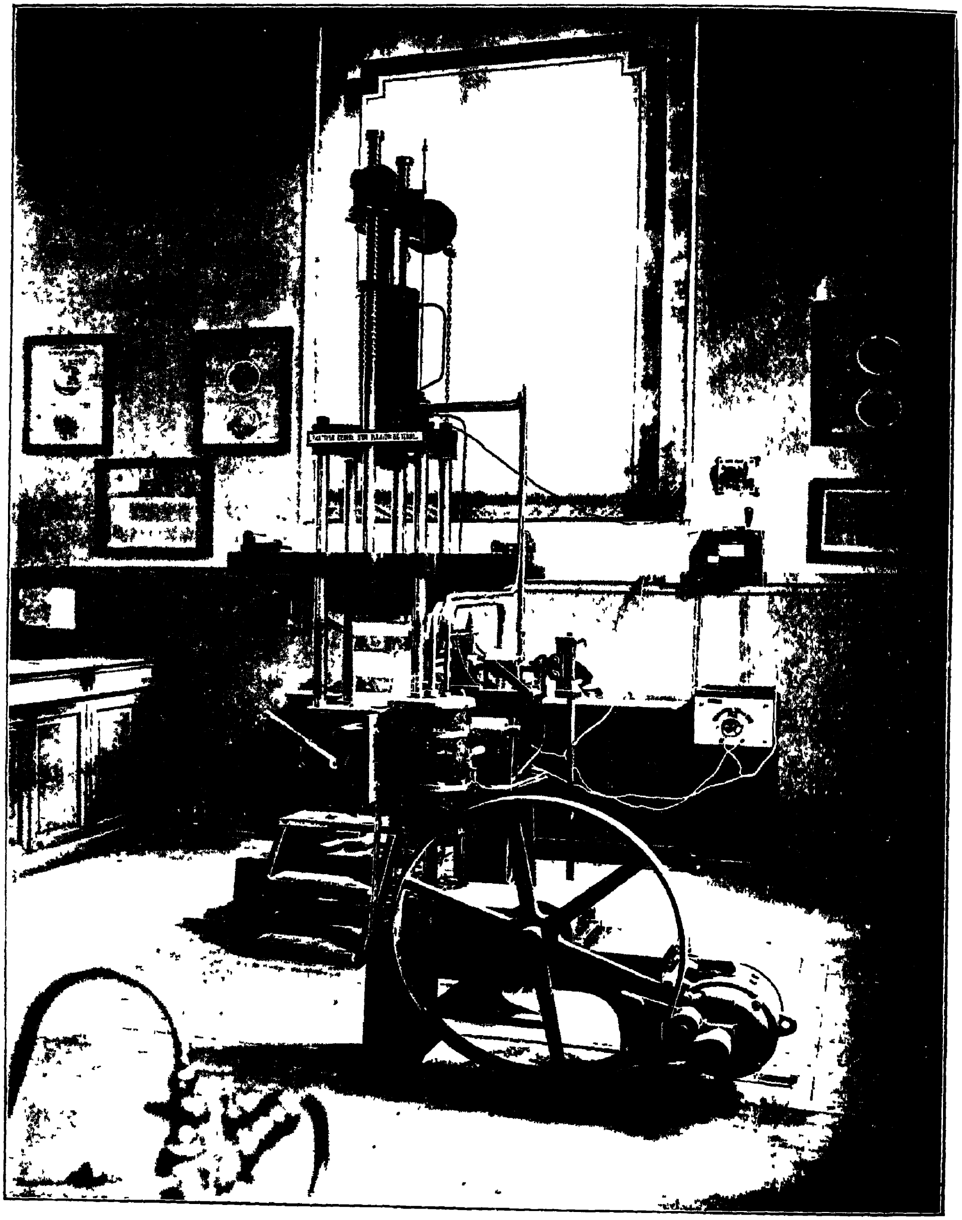


Fig. 83 *bis*

Dispositif de traction à chaud, monté sur machine Amsler de 50 t. avec régulation automatique de température.

En examinant l'extrémité interne de la fissure, il a paru également que celle-ci se propageait en suivant les parties hétérogènes du métal et principalement en suivant les points où se trouvent les impuretés. Il semblerait que ces points constituent des centres de moindre résistance qui attirent la fissure. L'explication de propagation de la fissure serait donc la suivante :

Pendant l'état de vibration de l'éprouvette, il se produit une désagrégation autour de chaque zone d'impuretés, ce qui constitue comme des amorces de rupture et la fissure se propage en suivant ces zones d'impuretés.

§ 7. **Essais à températures variées.**

La plupart des essais ci-dessus indiqués, en plus de ceux de viscosité, peuvent s'effectuer à températures variées, permettant ainsi de déterminer les caractéristiques mécaniques des métaux et alliages aux températures élevées ou aux températures basses.

Pour les températures élevées, les mêmes machines sont généralement utilisées avec, en plus, un dispositif de chauffage électrique placé autour de l'éprouvette (fig. 83 *bis*).

Pour les températures basses, les éprouvettes sont plongées dans divers mélanges réfrigérants.

Ces déterminations sont fort importantes pour de nombreux buts : étude de la tenue des soupapes de moteurs, fixation des meilleures températures de laminage à chaud, étude du fonctionnement de pièces de condenseurs, étude de la tenue des métaux aux températures basses.

En ce qui concerne l'aéronautique, ces derniers résultats sont particulièrement utiles à connaître pour la pratique des vols à haute altitude, pendant lesquels des froids considérables sont enregistrés.

Nous aurons l'occasion, au cours de cet ouvrage, de signaler pour certains métaux ou alliages les particularités observées à ces températures variées.

TITRE III

LES TRAITEMENTS

CHAPITRE VIII

GÉNÉRALITÉS SUR LES MODIFICATIONS ET TRANSFORMATIONS STRUCTURALES AU COURS DES TRAITEMENTS

Les différents phénomènes susceptibles de se produire dans les métaux et alliages au cours des divers traitements mécaniques, thermiques ou chimiques, étant souvent en étroite dépendance, nous rassemblerons d'abord les définitions de ces phénomènes de façon à créer une idée d'ensemble, nous réservant de revenir sur eux en détail et de manière approfondie dans l'étude particulière des traitements ou dans celle des alliages eux-mêmes.

Solidification. — Nous avons vu que la solidification d'un métal ou d'un alliage s'effectuait à une température déterminée ou dans un certain intervalle de température. Les premiers germes solides, infiniment petits, apparaissant au début de la transformation, grossissent peu à peu au détriment du liquide environnant ; ce développement se poursuit soit sous forme de cristaux bien nets, délimités par des faces planes, soit sous forme de dendrites ou cristallites, sortes d'arborescences à trois directions de croissance privilégiées (fig. 84). Ces développements finissent par se rencontrer et l'on obtient ainsi, lorsque tout est solide, les grains du métal ou de l'alliage.

Au point de vue physique seul, la grosseur finale de ces grains est surtout influencée par :

La nature du produit;

Les impuretés qu'il renferme;

Son histoire thermique, antérieure au début du refroidissement;

La vitesse de refroidissement, non seulement pendant le passage

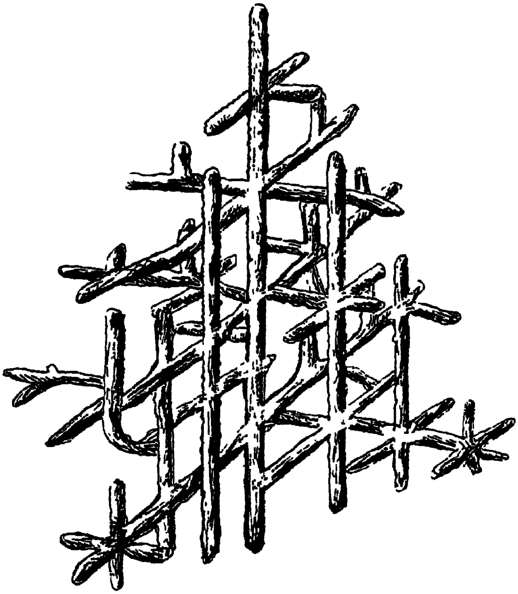


Fig. 84

Schéma de dendrite

de l'état liquide à l'état solide, mais aussi pendant la descente jusqu'à la température ordinaire, et ceci suivant les différents points de la pièce ou du lingot, la grosseur du grain pouvant être hétérogène d'un point à un autre.

Au point de vue physico-chimique, les diagrammes indiquent les genres de structures obtenues après solidification (1). Dans le cas des dépôts de solutions solides, une variation continue de compositions doit se réaliser entre solide et liquide pour les températures entre liquidus et solidus; mais ceci n'est que théorique et

(1) En supposant des refroidissements assez lents; dans le cas contraire, des effets de trempe *peuvent* intervenir (Voir plus loin).

n'est pratiquement vrai que pour les vitesses très lentes de refroidissement; en pratique cette variation ne se produit que rarement



Fig. 85.
Dendrites de composition hétérogène (bronze à 5 % d'étain).



Fig. 86.
Structure de la figure 85 après recuit (bronze à 5 % d'étain).

dans toute son ampleur et l'on obtient dans le grain, à l'état brut de coulée, une hétérogénéité chimique continue, plus ou moins accentuée selon les cas, entre le pourtour et le cœur, les transports

chimiques entre ces deux zones n'ayant pas eu le temps de s'effectuer complètement (fig. 85).

C'est par un recuit que l'homogénéisation sera réalisée (fig. 86).

Diffusion. — La diffusion est un échange chimique, un déplacement, entre deux zones de compositions différentes, ces zones pouvant d'ailleurs être contiguës ou à des distances très faibles.

Ces deux zones peuvent être, suivant les cas, séparées par une solution bien nette de continuité chimique, ou simplement constituer une progression continue qui alors, par diffusion, tend à s'homogénéiser.

La diffusion implique l'existence de miscibilités.

A l'état liquide, la diffusion est facile à concevoir et elle est rapide en raison de la faible viscosité des milieux.

A l'état solide, elle peut aussi exister, mais il faut que la température soit telle qu'une trop forte viscosité solide n'empêche pas la diffusion, du moins dans des limites de temps raisonnables. La zone de température autorisant une diffusion variera naturellement d'un métal ou d'un alliage à un autre.

Écrouissage. — Supposons d'abord un alliage à structure homogène et ne présentant pas de modifications physico-chimiques à l'état solide : métal pur ou solution solide unique.

Si l'on déforme ce produit à diverses températures, en le martelant, on peut distinguer, au-dessous de la température du solidus, deux zones contiguës de températures :

Une zone inférieure, dans laquelle le produit voit ses propriétés nettement modifiées (1); il passe ainsi à l'état d'*écrouissage ;*

une zone supérieure, dans laquelle les propriétés restent sensiblement inchangées; là, l'écrouissage ne peut être réalisé.

La limite entre ces deux zones caractérise la température d'apparition (ou de disparition) de l'écrouissage; cette température varie d'un métal à un autre; pour certains métaux comme le plomb, le thallium, l'étain, elle est inférieure à la température ordinaire, de sorte que ces métaux forgés à cette température ordinaire

(1) Il faut évidemment supposer que le metal ou l'alliage peut se déformer, c'est-à-dire qu'il n'a pas une résilience nulle et que sa limite élastique est assez nettement inférieure à la charge de rupture, aux températures envisagées.

ne durcissent pas comme le font tous les autres; la température de travail étant supérieure à celle de disparition de l'écrouissage, celui-ci ne se produit pas. Si, au contraire, on les déforme dans l'air liquide, ils durcissent, car la température d'apparition de l'écrouissage est plus élevée; et si on remonte, à la température ordinaire, ces produits durcis, leur dureté redescend à sa valeur normale.

Un produit écroui, porté à une température de la zone supérieure (traitement thermique du *recuit*) voit, en effet, disparaître son écrouissage.

Quel est donc l'effet interne de l'écrouissage? Il est double :

1° La déformation imposée au métal brise les grains; des *plans*

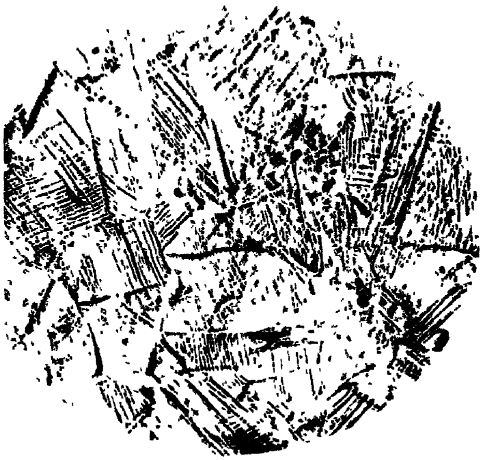


Fig 87

Plans de clivage dans un bronze à 5 % d'étain, martelé à froid après recuit

de clivage apparaissent dans chacun d'eux, suivant des directions bien déterminées (fig. 87); chaque grain donne ainsi naissance à plusieurs éléments, d'autant plus nombreux que la déformation est plus importante, la facilité de déformation étant liée d'autre part à la faiblesse de la limite élastique;

2° Les efforts extérieurs exercés, joints à cet état de désorganisation cristalline, ont provoqué l'existence de « tensions internes », souvent très élevées, à l'intérieur du métal; la répartition de ces tensions, leur direction dépendent des sens des déformations initiales, de la forme de la pièce et de sa résistance, de la manière dont ces déformations se sont transmises dans la masse.

Comme conséquence directe de ce double effet, la dureté du métal augmente, cas général, la valeur de cette propriété variant toujours dans le même sens que le nombre des éléments cristallins et subissant aussi la répercussion des tensions internes; la limite élastique et la charge de rupture croissent et en viennent finalement à se confondre; par contre, les allongements, la striction et la résilience tombent rapidement.

Quant au recuit du métal, il a pour effet de provoquer une recristallisation vers la grosseur normale des grains, et de faire disparaître les tensions internes en communiquant aux molécules métalliques une mobilité favorable au retour à l'équilibre mécanique interne.

S'il s'agit, comme nous l'avons supposé, d'un métal pur ou d'une solution solide homogène, l'écrouissage se produit dans toute la masse, suivant un processus uniforme, mais à un degré différent d'un point à un autre. Sa valeur dépend du mode de transmission, plus ou moins intense, de la déformation vers le cœur de la pièce.

Si, au contraire, la structure est hétérogène, chaque espèce d'élément physicochimique est influencée pour son propre compte par la déformation, suivant son élasticité et ses possibilités d'écrouissage propres; de même si des transformations interviennent à l'état solide.

Corroyage. — Le corroyage est l'état d'un métal après défor-



Fig 88.
Acier forgé

mation mécanique à une température de la zone supérieure de non-écrouissage.

Les propriétés ne sont pas sensiblement modifiées, avons-nous



Fig. 88 *bis*.
Acier laminé

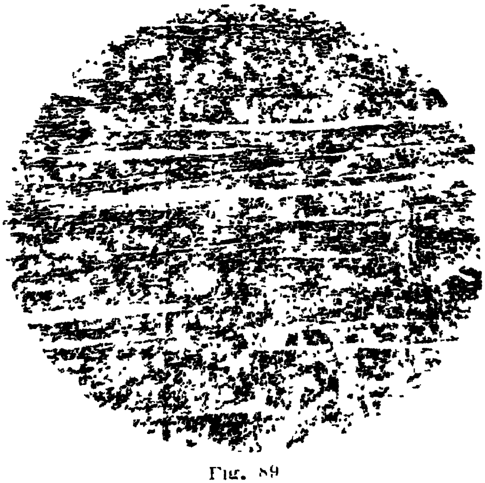


Fig. 89
Ségrégations alignées dans un acier par les déformations mécaniques antérieures, le reste de la structure ayant été régénéré par un recuit.

dit; en réalité, certaines d'entre elles le sont légèrement, surtout dans le sens de la déformation lorsque celle-ci a été exercée dans

une direction définie; le travail du métal a créé en effet des sortes de fibres cristallines dans ce sens de déformation (fig. 88 et 88 *bis*);

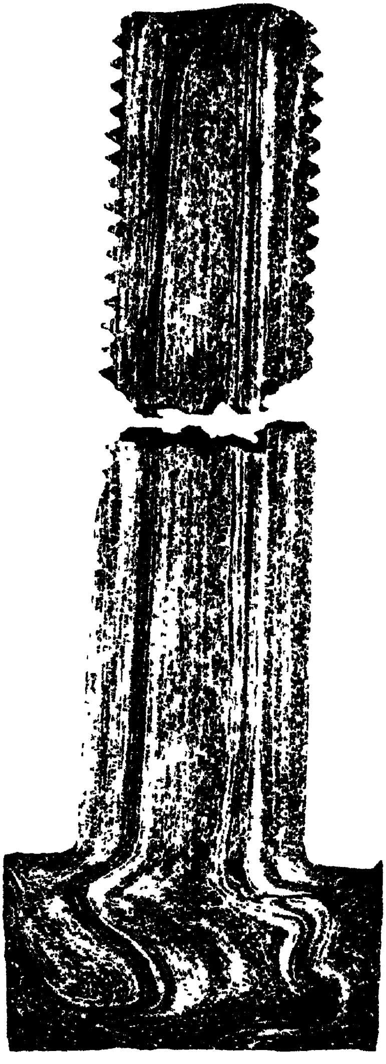


Fig. 89 *bis*.
Boulon . coupe macrographique.

les ségrégations sont également alignées dans les mêmes directions (fig. 89 et 89 *bis*), et le recuit les laisse dans cet état.

Traitements thermiques. — Nous avons vu que les chauffages à l'état solide diminuaient la viscosité, favorisant ainsi les échanges chimiques de stabilisation, la croissance des grains et la disparition des tensions mécaniques internes.

La grosseur du grain *à la fin d'un chauffage* est, en dehors de l'histoire antérieure du métal, fonction de la température du chauffage et du temps de son maintien.

Si l'un de ces deux facteurs ou si les deux prennent une valeur trop élevée, le grain grossit de manière exagérée, les joints de grains deviennent des solutions de continuité par trop nettes, et le métal acquiert de la fragilité suivant ces séparations intercristallines; on dit que l'on tombe dans le phénomène de la *surchauffe*, *purement physique* par conséquent.

Si la température s'élève encore jusqu'aux alentours du solidus, et ceci pendant un temps suffisant, si même l'on dépasse ce solidus pendant un temps qui peut alors être beaucoup plus réduit, on crée la *brûlure :* les gaz oxydants de l'atmosphère s'introduisent dans le métal par les joints des grains, réagissent sur ces pourtours de grains et, si le solidus est dépassé, sur les particules liquides naissantes; il y a alors une altération d'ordre *chimique*.

Des réchauffages modérés et refroidissements convenablement conduits permettent de ramener les grains d'un métal surchauffé à des dimensions normales; nous verrons plus loin comment. Mais la brûlure ne peut être régénérée à l'état solide : il faut refondre et apporter un remède chimique à cette maladie chimique.

Trempe. — Supposons un alliage binaire X susceptible de modifications physicochimiques à l'état solide, et prenons-le à une température θ pour laquelle la structure est différente de celle normalement stable à température ordinaire. Ceci sera obtenu dans l'un des deux cas suivants :

a) franchissement d'une ligne ou d'une zone de transformation (fig. 90);

b) montée dans un domaine à deux phases (fig. 91).

Dans ce cas, il faut supposer que le domaine est limité latéralement par au moins une ligne courbe impliquant une variation progressive de composition de la phase correspondante.

Refroidissons cet alliage à des vitesses croissantes à partir de la température θ, il y aura une vitesse à partir de laquelle les trans-

formations ou modifications continues de composition au refroidissement n'auront plus le temps de s'effectuer normalement; la structure obtenue différera de la structure stable obtenue après un refroidissement lent, et ceci ou sens *physico-chimique* du mot et non pas seulement au sens uniquement physique de la finesse du grain, elle aussi corollaire de la vitesse de refroidissement.

On dira alors qu'il s'est passé un phénomène de *trempe*.

La trempe consiste donc, et cela grâce à une vitesse suffisante de refroidissement, dans le maintien à la température ordinaire d'un

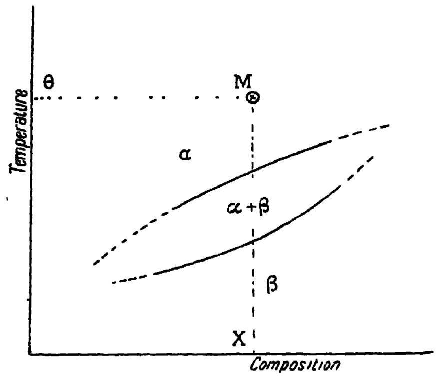


Fig. 90.

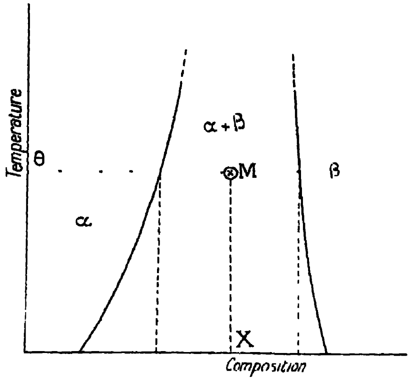


Fig. 91.

état normalement stable seulement à chaud, ou dans l'obtention d'un état intermédiaire entre l'état stable à chaud et l'état stable à température ordinaire (1).

La constitution physico-chimique d'un alliage étant ainsi changée par la trempe, les propriétés seront elles aussi modifiées, parfois très profondément.

De plus, en raison des rapides changements de volumes : contraction due au refroidissement rapide proprement dit, alternances de contractions et dilatations dans les passages par les zones de transformations, il se produira des tensions internes dans la masse du métal.

(1) Les états intermédiaires peuvent ne pas être seulement des états participant à la fois de l'état stable à chaud et de l'état stable à froid, ils peuvent être des états spéciaux de transition, possédant des propriétés et caractères particuliers.

Revenu. — Supposons une trempe effectuée par traversée suffisamment rapide d'une ligne ou d'une zone de transformation, les nouvelles propriétés seront différentes des anciennes et certaines d'entre elles pourront être défavorables pour les emplois; le revenu a pour but de pallier à cet inconvénient, par un chauffage à une température inférieure à celle de transformation; il en résultera : 1° une disparition plus ou moins totale des tensions internes de trempe; 2° des structures nouvelles, caractéristiques de ce revenu; ces structures pourront dans certains cas communiquer un ensemble amélioré des propriétés.

Le revenu est donc uniquement un traitement complémentaire de la trempe.

Recuit. — Le recuit est un chauffage suivi d'un refroidissement à une vitesse inférieure à celle d'apparition de l'effet de trempe.

La structure obtenue sera donc celle de stabilité à température ordinaire, indiquée par le diagramme d'équilibre.

La variation des températures de chauffage et des vitesses de refroidissement dans le domaine qui vient d'être défini, conduira, après un temps suffisant de chauffage, à des différences finales (1) d'ordre seulement physique, liées à la grosseur du grain ou au mode de répartition des constituants.

Le recuit permet d'obtenir l'état structural *théoriquement* et pratiquement stable.

Des stabilités *pratiques* doublées de caractéristiques supérieures peuvent être obtenues pour des revenus exécutés à des températures judicieusement choisies (cas des aciers-structure sorbitique).

(1) Il est bien entendu qu'il s'agit des structures finales, le recuit entraînant dans de très nombreux cas, des modifications *d'ordre chimique au cours* de son exécution même.

CHAPITRE IX

FONDERIE ET COULÉE

Nous devons étudier ici le passage de l'état liquide à l'état solide, cette opération ayant lieu, au point de vue pratique, soit dans la coulée de lingots, soit dans celle de moulages en vue d'obtention directe de pièces presque finies.

§ 1. Obtention du métal liquide. — Le métal liquide est obtenu, soit en *première fusion* dans l'élaboration à partir du mi-



Fig. 92.
Four Morgan basculant.

nerai, soit en seconde fusion après refusion des lingots de première fusion ou de déchets divers.

Le premier cas sera étudié pour chaque métal dans les chapitres à venir.

Le second est réalisé dans des fonderies à l'aide de fours de formes très diverses; ceux les plus courants sont *à creusets ;* ces récipients

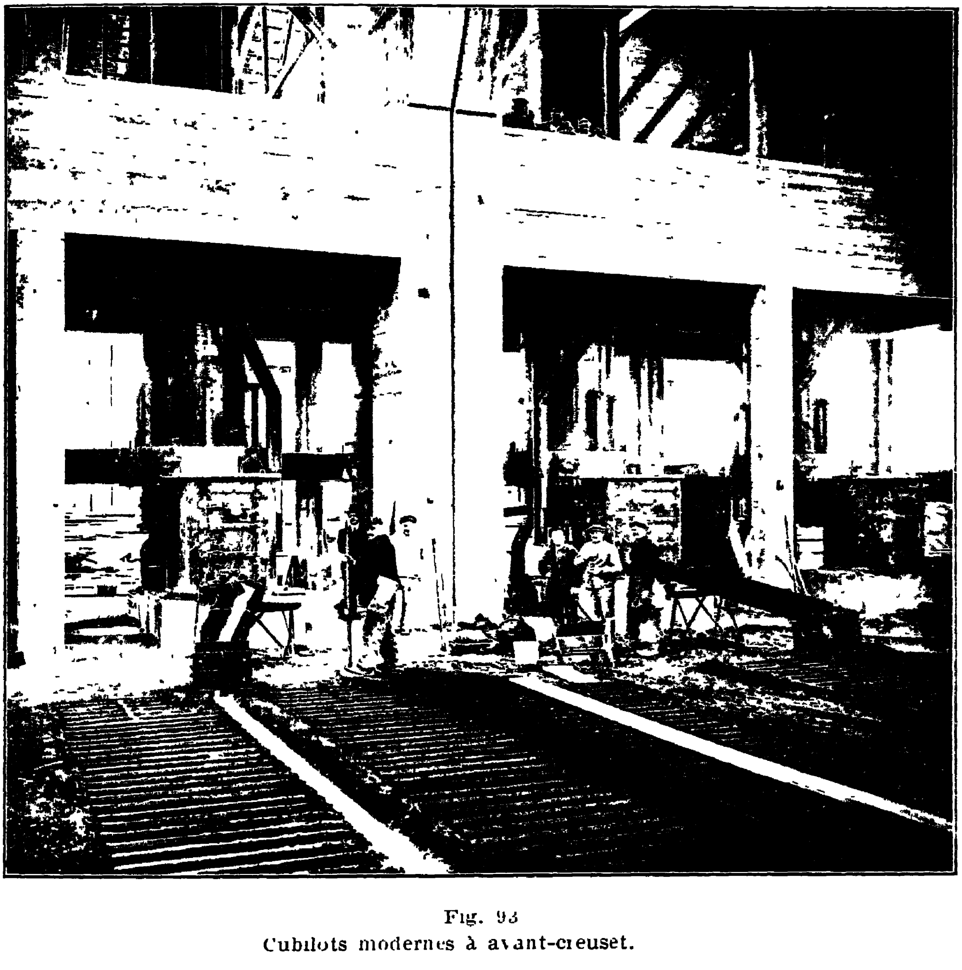


Fig. 93
Cubilots modernes à avant-creuset.

sont en matières réfractaires variées, argileuses, alumineuses, ou en carbone ou carborundum; on emploie parfois des garnissages intérieurs basiques en dolomie ou magnésie. Ces creusets sont chauffés soit au coke (fours potagers), soit au charbon pulvérisé, soit à

l'huile, soit électriquement (par résistance, par arc ou par induction); on a le plus souvent un seul creuset par four (fig. 92).

On utilise également des fours plus importants, comme les cubilots, pour la refusion de la fonte (fig. 93), ou des fours à reverbère ou des fours électriques à sole.

§ 2. Affinage. — On profite souvent de ce passage par l'état liquide pour affiner le métal ou l'alliage après ajustement de sa composition; ce traitement se fait le plus souvent par des additions convenables; la désoxydation du bain en est l'un des buts les plus importants; elle consiste dans l'addition d'un métal plus oxydable (principe du travail maximum), le nouvel oxyde formé se présentant sous une forme facile à éliminer (solide ou gazeuse ou liquide avec différence de densité).

§ 3. Coulée. — Les lingotières sont presque toujours métalliques, en fonte ou en acier coulé; elles comportent quelquefois des

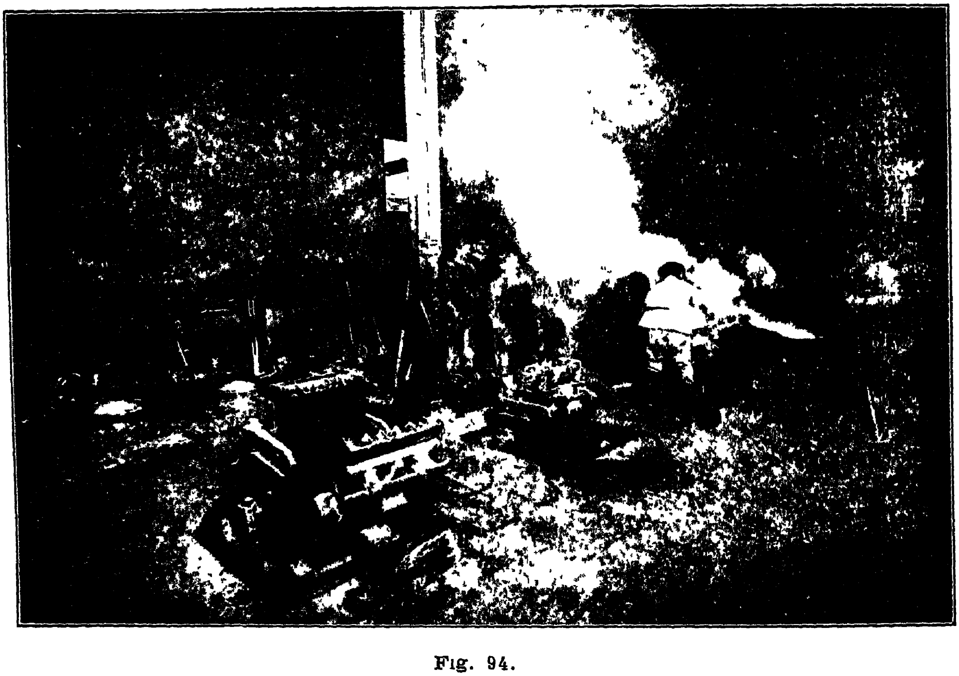


Fig. 94.

panneaux intérieurs de cuivre; généralement on les enduit avant

la coulée d'une huile ayant pour but d'empêcher toute adhérence, de réaliser sur la pièce une belle « peau » et de créer dans le moule, par combustion, une atmosphère de gaz réducteurs.

Souvent on interpose sur le jet de métal liquide une trémie d'alimentation de la lingotière, trémie percée de plusieurs trous, afin de diviser le jet et d'obtenir un remplissage bien tranquille et homogène sans que le liquide vienne heurter, dans sa chute, les parois de la lingotière (fig. 94).

Quant aux moules, ils sont ou métalliques, ou en sable, ou mixtes.

Les moules métalliques (coulée en coquille) dérivent d'une conception analogue à celle ci-dessus exposée.

Les moules en sable sont préparés de la façon suivante : on fa-



Fig. 95.

Mouleries d'acier Châtillon-Commentry
Rails acier au manganèse.

brique d'abord un « modèle », d'habitude en bois, reproduction assez exacte de la pièce à réaliser, les différences de dimensions répondant à la prévision des variations de volume (retrait) du métal ou de l'alliage, et des possibilités de coulée de la pièce si la

forme en est compliquée. Le moule lui-même est formé de châssis métalliques à l'intérieur desquels on tasse du sable au contact du modèle; les différentes parties ainsi réalisées sont assemblées et constituent le moule (fig. 95); le tassement du sable est fait à la main ou mécaniquement; les qualités de sable ont une grosse importance; l'intérieur du moule est souvent recouvert d'un enduit à base de graphite; certains moules sont étuvés avant coulée, par opposition au moulage « à vert »; enfin, pour l'obtention de certaines excavations dans les pièces, on complète, s'il y a lieu, le moule par des « noyaux », pièces séparées en sable qui viennent s'ajuster dans le modèle proprement dit avant son assemblage.

On fait également des moulages « au trousseau » pour les pièces de forme extérieure cylindrique : un profil en bois tourne autour d'un axe vertical et vient réaliser dans sa rotation la surface intérieure du moule.

La manière dont le métal est versé dans le moule permet de distinguer :

la coulée *directe* ou *en descente*, dans laquelle le métal tombe de haut en bas et directement dans le moule lui-même (fig. 96);

la coulée *en source*, dans laquelle le métal tombe d'abord dans

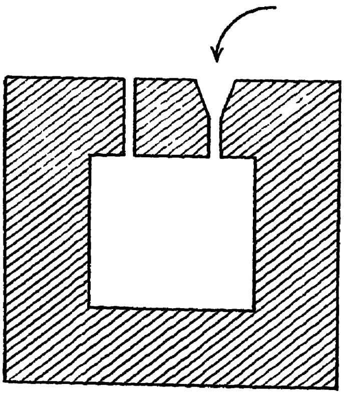


Fig. 96.

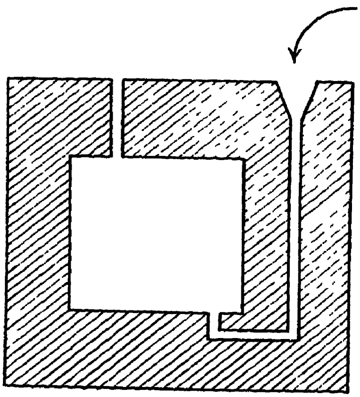


Fig. 97.

un canal vertical ménagé dans la paroi du moule; ce canal aboutit au fond du moule et le métal liquide remonte ainsi dans le moule qu'il finit par remplir complètement; ce dernier procédé est plus tranquille et rationnel (fig. 97).

Dans le cas des métaux très oxydables, on incline la lingotière ou

le moule au début de la coulée, et on le redresse peu à peu, comme dans une décantation lente, de façon que l'approvisionnement de métal dans le moule se fasse très doucement sous une pellicule protectrice d'oxyde formant la surface de la nappe.

La température de coulée du métal liquide a une très grosse importance.

On prépare parfois des moules mixtes partiellement métalliques, partiellement en sable; la partie métallique (coquille) provoque à son contact un refroidissement plus rapide du métal adjacent, d'où la possibilité d'obtenir des propriétés différentes du métal, suivant les différentes régions de la pièce.

Signalons pour terminer :

La *coulée par centrifugation*, pour l'obtention de corps creux, le moule étant mis en rotation rapide lorsque le métal liquide est introduit:

La *coulée sous pression*, le métal étant injecté sous pression dans des moules métalliques, d'où obtention de pièces très saines et d'un beau fini de détails de surface;

La *coulée de lingots doubles ou triples :* on coule un premier alliage dans une lingotière dont les grandes faces sont mobiles et peuvent, lorsque le premier lingot est solidifié, s'écarter de lui, laissant deux intervalles où l'on coule un autre alliage: il y a diffusion intermétallique entre l'alliage central et les alliages latéraux et la soudure se réalise donc parfaitement, mais les différences de contraction au refroidissement ou le passage par des points de transformation peuvent amener dans certains cas des anomalies. On lamine ensuite l'ensemble du lingot. Cette méthode n'a encore été employée que pour donner des pièces dures en surface et résilientes à cœur (but analogue à la cémentation de l'acier doux par le carbone). Quelquefois on ne coule le second alliage que d'un seul côté du premier.

§ 4. Défauts des lingots et moulages. — Les principaux défauts des lingots seront étudiés en détail dans le deuxième volume, à propos des lingots d'aciers; nous nous bornerons à donner ici quelques notions d'ensemble sur les défauts des pièces coulées.

Défauts physiques. Retassure. — On nomme ainsi une cavité provoquée dans le lingot ou dans le moulage par le retrait à la solidi-

fication et au refroidissement : la solidification commence en effet par la périphérie de la masse liquide, au contact de la lingotière ou du moule froid, et éventuellement au contact de l'air à la partie supérieure; il se forme donc une carapace solide dans laquelle la solidification se poursuit suivant des surfaces isothermes; cette solidification donne en même temps lieu à diminution de volume, et cette diminution se traduit finalement par un vide au cœur du lingot ou du moulage (fig. 98).

Ce phénomène sera d'autant plus accentué que la « prise » de l'alliage sera plus rapide; il sera donc favorisé par un faible écarte-

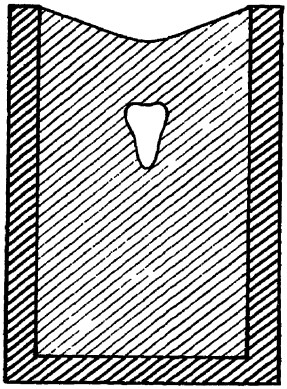


Fig. 98.

ment entre liquidus et solidus; il sera maximum pour les métaux purs, les combinaisons, les eutectiques, à point de fusion unique.

Les grandes conductibilités calorifiques, provoquant un départ rapide des calories du cœur du lingot vers l'extérieur, favorisent aussi le phénomène (difficultés de coulée du cuivre pur).

On remédie à ce défaut en provoquant en un endroit voulu cette formation de retassure, soit qu'en cet endroit, la cavité ne gêne pas, soit mieux que l'on ait réalisé pour cette localisation un appendice que l'on fait sauter après délingotage ou démoulage.

Ce déplacement de la retassure se fait en modifiant convenablement la forme et la progression des surfaces isothermes, par exemple en réchauffant certains points afin d'y attirer la retassure, ou en en refroidissant d'autres (par des coquilles) pour l'en éloigner.

Soufflures, porosités. — Ce sont de *très petites* cavités, souvent en très grand nombre, qui proviennent de l'occlusion de bulles gazeuses dans le métal; leur origine est très diverse : on peut avoir des bulles d'air restant occluses au cours d'une solidification rapide du métal venant de tomber dans la lingotière ou le moule; on peut avoir des dégagements gazeux provenant du moule lui-même, ou mieux de l'enduit organique qui tapisse son intérieur; on peut enfin avoir des gaz solubles dans le métal liquide, insolubles totalement ou partiellement dans le métal solide.

On y remédie par de bonnes conditions de coulée et de préparation du moule, et par un affinage convenable du métal liquide, avant coulée.

Il ne faut pas confondre ce phénomène avec la présence de gaz occlus, *en solution* dans le métal solide et qui font partie intégrante de ce dernier.

Criques. — Ce sont des fissurations provenant de tensions à la solidification. Elles se produisent dans les pièces dont la préparation en fonderie a été mal étudiée : si par exemple on laisse des parties transversales trop massives et insuffisamment calculées dans un ensemble périphérique trop frêle, celui-ci peut criquer, ou inversement. On agit également par un réglage du refroidissement et, si des tensions résiduelles dangereuses restent, par des recuits ultérieurs.

Gouttes froides. — Il s'agit là de petites particules qui se détachent du jet, viennent seules en contact avec la paroi de la lingotière ou du moule, se solidifient à part et ne se ressoudent pas au reste de la pièce, généralement par suite de la formation d'une pellicule oxydée en surface. On agit sur ce défaut en réglant convenablement la chute du jet et en coulant « plus chaud ».

Défauts chimiques. — Hétérogénéité chimique à l'intérieur des cristaux. — Nous avons parlé de ce défaut à propos de la solidification, page 164; remarquons que les grands écartements entre liquidus et solidus permettront de prévoir *a priori* ces hétérogénéités cristallines, faciles à rectifier d'ailleurs par un simple recuit.

Ségrégation ou liquation. — Le phénomène de refroidissement et solidification progressifs vers le cœur du lingot ou du moulage, phé-

nomène déjà décrit ci-dessus à propos de la retassure, provoque des séparations chimiques et des hétérogénéités, non plus dans le cristal, mais dans toute la masse du métal; on conçoit facilement en effet que les non-miscibilités liquides ou solides entraînent ces séparations de certains constituants et provoquent la localisation vers le cœur, des parties se solidifiant les dernières par suite d'un point de fusion plus bas; la figure 88 montre de telles ségrégations, alignées par le forgeage. Ce phénomène est très dangereux, car un recuit est impuissant à ramener une homogénéité, et les rassemblements possibles d'impuretés provoquent des régions de moindre résistance.

§ 5. Finition. — Lorsque les lingots sont destinés à un laminage à froid, ils sont écroutés pour enlèvement des petites irrégularités ou impuretés de surface.

Quant aux moulages, leur surface est généralement perfectionnée par une finition mécanique ou chimique, surtout dans le cas de la coulée en sable qui donne souvent une peau assez rugueuse; enfin, les bavures de métal correspondant aux joints des diverses parties du moule sont meulées ou burinées à la main ou mécaniquement.

§ 6. Traitements thermiques des pièces coulées. — Dans le cas d'obtention de structures très dendritiques (acier coulé) ou hétérogènes (bronze), il est avantageux, parfois même indispensable, de faire subir au métal un recuit de stabilisation ayant pour but d'homogénéiser la structure.

La coulée en coquille donne souvent des états trempés qu'il faut quelquefois atténuer par un revenu ou détruire par une trempe.

Le retrait au refroidissement provoque fréquemment des tensions internes, surtout dans les pièces en forme d'anneaux, tensions que l'on détruit également par un recuit convenable.

Enfin, certains traitements chimiques comme la malléabilisation des fontes sont effectués sur pièces brut de coulée.

CHAPITRE X

TRAITEMENTS MÉCANIQUES

§ 1. BUT DES TRAITEMENTS MÉCANIQUES. — Le but des traitements mécaniques est de modifier la forme du métal par une action mécanique exécutée à une température convenable; ce traitement donne également la structure fibreuse dont il a été question plus haut.

Le choix de la température optima est guidé par deux sortes de considérations :

1° *Obtenir les qualités nécessaires pour la bonne exécution de l'opération envisagée :* si par exemple on opère par déformation lente, il faut rechercher une température à laquelle correspondent une limite élastique basse et des allongements importants du metal ou de l'alliage à travailler; si l'on opère par chocs, il faut une température pour laquelle la résilience est élevée, les propriétés precédentes de malléabilité restant néanmoins suffisantes.

Il faut de plus que ces propriétés optima se maintiennent dans une zone assez grande autour de la température ci-dessus envisagée car, au point de vue industriel, on ne pourra pas toujours maintenir la température dans des limites très étroites: cela dépendra du mode de déformation choisi et de l'appareillage employé; c'est ainsi qu'à partir d'une certaine finesse de dimensions, certains produits devront être travaillés à froid, le maintien dans un intervalle restreint de températures élevées optima devenant impossible à réaliser par suite du refroidissement trop rapide à l'air.

Une étude de forgeage devra donc commencer par une détermination de la variation de ces propriétés mécaniques essentielles en fonction de la température; les courbes obtenues permettront de déduire immédiatement la meilleure zone de travail. Les résultats seront parfois très variés : c'est ainsi que le laiton 60.40 peut être

forgé à chaud, tandis que le 67.33 se travaille seulement à froid; à chaud, ce dernier, fragile, casse trop facilement.

2° *Obtenir les qualités exigées pour le produit fini :* si l'on veut un état *écroui*, il faudra évidemment terminer par un travail à basse température.

La structure d'ensemble désirée dans le produit fini peut enfin conduire à des modes spéciaux de travail ou à des particularités d'appareillage.

§ 2. — L'ÉCROUISSAGE DANS LE TRAVAIL MÉCANIQUE. — Lorsqu'on déforme de plus en plus un métal en l'écrouissant, il arrive à un état limite d'écrouissage au-dessus duquel il se rompt : les allongements et la résilience deviennent en effet nuls, la limite élastique vient se confondre avec la charge de rupture; si l'on cherche encore à déformer, le métal casse. D'où la nécessité de recuits périodiques lorsqu'on travaille un métal dans sa zone normale d'écrouissage.

Nous avons défini la température d'apparition ou de disparition de l'écrouissage d'un métal ou d'un alliage.

En réalité, il n'y a pas là une température unique nettement déterminée; le temps a également son influence; supposons un métal écroui; un maintien prolongé à une certaine température et un maintien plus court à une température un peu plus élevée pourront aboutir au même résultat; le temps a une influence limitée : à une température déterminée, un recuit prolongé conduit asymptotiquement vers un état défini.

L'écrouissage disparaît d'ailleurs d'autant plus vite et facilement qu'il est initialement plus accentué : si l'on recuit suffisamment, à la même température et pendant le même temps, deux échantillons d'un même alliage, l'un fortement écroui, l'autre moyennement écroui, le premier révélera après recuit un grain plus gros que le second après recuit identique.

Certains métaux dont la température industrielle de recuit est de l'ordre de 600 à 700° peuvent même, lorsqu'ils sont très violemment écrouis, perdre spontanément une partie de cet écrouissage à la température ordinaire; des exemples en seront donnés dans le volume II.

L'état d'écrouissage est donc un état éminemment instable : nous

reviendrons plus loin sur les conséquences pratiques de cette constatation.

Les variations des propriétés mécaniques en fonction de l'écrouissage et les variations inverses en fonction du recuit affectent toujours, quel que soit le métal ou l'alliage, des formes caractéristiques.

Et tout d'abord, comment chiffrer la valeur d'un écrouissage?

Ou bien l'on utilise l'une des formules :

$$\frac{S - s}{S} \quad \text{ou} \quad \frac{S - s}{s}$$

S et s étant les sections de la pièce avant et après déformation;

ou bien on emploie les valeurs de certaines propriétés mécaniques :

$$\text{Charge de rupture : } \frac{\text{R (écroui)} - \text{R (recuit)}}{\text{R (recuit)}}$$

$$\text{Dureté Brinell : } \frac{\Delta\ \text{(écroui)} - \Delta\ \text{(recuit)}}{\Delta\ \text{(recuit)}}$$

et l'on multiplie ces expressions par 100, ce qui donne le *coefficient d'écrouissage* pour 100.

Quand on écrouit de plus en plus un métal, les variations des propriétés mécaniques essentielles ont la forme donnée par la figure 99; on voit que les variations sont *très rapides au début*, puis tendent lentement vers des limites.

Les variations des propriétés du métal écroui en fonction du temps de recuit, pour une température donnée, sont d'allure analogue : variation rapide dans les premiers instants de chauffage, mais naturellement inverses.

Quant aux variations de ces propriétés en fonction de la température de recuit, pour un temps suffisant conduisant à la stabilisation des propriétés, elles affectent des formes plus complexes, schématisées par la figure 100.

On peut distinguer quatre zones :

1° Une zone I de températures inférieures où l'influence est nulle;

2° Une zone II de variations rapides;

3° Une zone III où les valeurs sont à peu près constantes; c'est la zone de recuit complet;

4° Une zone IV où toutes les propriétés tombent; c'est la région de surchauffe.

Bien entendu, comme nous l'avons vu, la zone II peut se déplacer

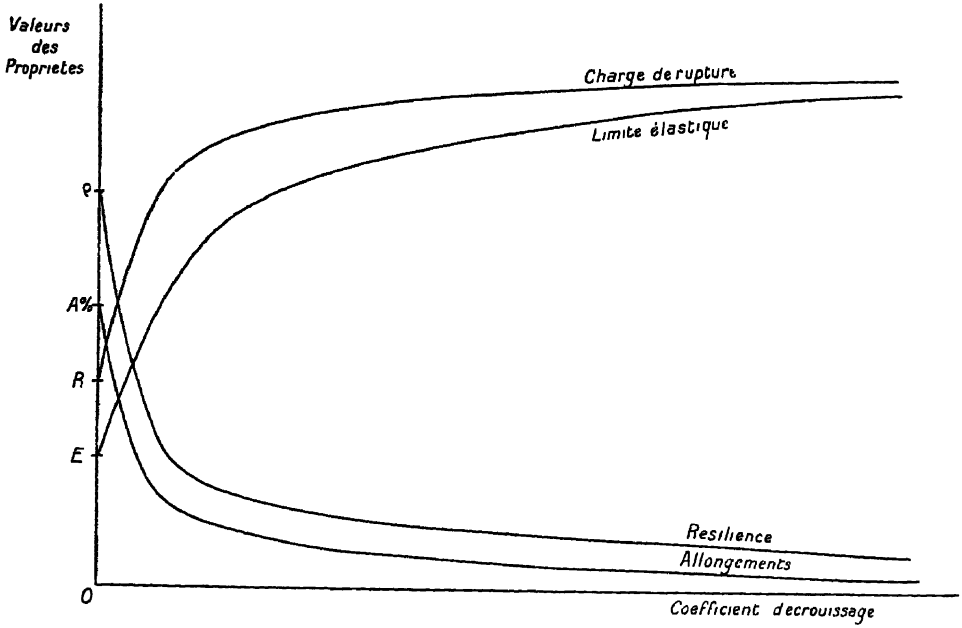


Fig. 99

vers la gauche ou vers la droite suivant la plus ou moins grande intensité de l'écrouissage initial.

Nous avons vu que l'écrouissage avait un double effet :

1° Clivage des grains;

2° Production de tensions internes.

Ces dernières sont parfois considérables, on en a mesuré atteignant 3.000 à 4.000 atmosphères.

Cet état de tension et d'instabilité physique peut avoir des conséquences fort dangereuses pour certains emplois : supposons en effet une région sous une tension élevée T; il se peut que T ne soit que peu inférieur à l'effort R déterminant la rupture; si la pièce subit en service un effort au moins égal à R — T et qui vienne s'ajouter à T, elle casse, et cette différence est parfois faible; si

l'effort extérieur est inférieur à R — T, on peut avoir déformation permanente.

Mais cet état écroui a un autre inconvénient. Il provoque dans certains cas un phénomène de fissuration des pièces, couramment appelé « Season Cracking »; des théories récentes ont cherché à expliquer ces accidents.

On suppose que dans les joints des grains, se trouve un ciment

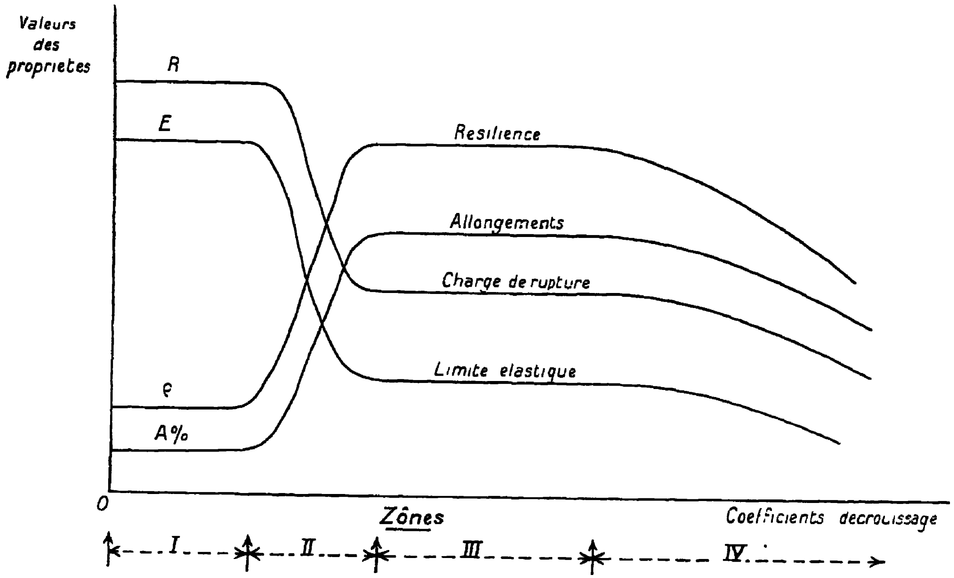


Fig. 100

qui soude les cristaux entre eux; ce ciment est constitué par le métal sous un état amorphe; lorsqu'on écrouit le metal, par suite des frottements internes, la quantité de ce ciment amorphe augmente; parallèlement, les tensions se révèlent et leur action se fait surtout sentir sur ces joints de ciment dont la viscosité est plus faible que celle du métal non amorphe; nous avons étudié page 112 le phénomène de viscosité; nous avons vu qu'il s'agissait d'un écoulement solide parfois très lent : D'après cela, le ciment amorphe, moins visqueux, se déformerait lentement sous l'effet des tensions et finirait par céder, d'où rupture intercristalline, *season cracking.*

Ce phénomène est accéléré par les actions corrosives : celles-ci s'insinuent en effet par les joints des grains, modifient la nature du

ciment et diminuent sa viscosité, d'où écoulement et rupture plus rapides sous l'effet des tensions.

Cette action de corrosion peut être simplement produite par une attaque gazeuse oxydante ordinaire. Elle peut être amplifiée en faisant intervenir des réactifs chimiques appropriés.

C'est ainsi que les écrouissages dangereux de certains laitons sont décelés par une immersion dans des solutions de sels mercureux. Si l'écrouissage est trop fort, la pièce casse avant un temps donné.

Les impuretés dans le métal se localisent dans les joints des grains et ont une action indéniable sur la viscosité du ciment, rendant celui-ci plus fluide et plus attaquable par corrosion.

On voit donc le danger présenté par des écrouissages excessifs.

Quand la sécurité n'est pas en jeu, c'est-à-dire quand les pièces ne sont pas soumises, comme dans l'Aéronautique, à des mouvements vibratoires intenses, on peut envisager l'emploi de l'écrouissage. Il permet d'élever l'élasticité et la résistance des allongements au détriment, il est vrai, de l'allongement et de la résilience.

Si on ne l'introduisait pas pour la confection de certaines pièces d'usage courant, celles-ci seraient inutilisables parce que trop malléables.

Il faut noter que les métaux s'écrouissent plus ou moins vite et de manière différente, probablement par suite d'une production plus ou moins facile de la phase amorphe ci-dessus définie; un certain taux d'écrouissage peut donc être plus dangereux sur un alliage déterminé que sur un autre pour des caractéristiques données d'emploi.

La suppression de l'écrouissage implique :

1° La destruction des tensions internes;

2° La recristallisation.

Ces deux effets ne se produisent pas forcément à des températures analogues; là encore, chaque alliage possède ses caractéristiques.

Généralement les tensions disparaissent avant que la recristallisation ne soit complète.

§ 3. Corroyage. — Le corroyage, déja défini plus haut, brise la cristallisation première et homogénéise la structure intime du métal en la dirigeant cependant parfois dans un sens de travail

déterminé ; on définit ainsi des sens suivant lesquels les propriétés sont un peu différentes d'un sens a l'autre.

Le coefficient de corroyage est le rapport de la section initiale de la pièce ou du lingot à sa section finale :

$$\frac{S}{s}$$

Ce phénomène sera étudié plus en détail à propos du lingot d'acier (volume II).

Il peut être avantageux de recuire le métal travaillé à chaud : certains forgeages entraînent, dans quelques alliages à deux constituants, la production d'une structure dite de Widmanstaetten, structure très fragile caractérisée par le fait qu'un constituant,



Fig. 101

Aspect de Widmanstaetten.

miscible avec l'autre à température élevée, s'isole au refroidissement dans les plans de clivage des grains (fig. 101).

Les recuits même très poussés n'arrivent jamais à supprimer complètement la différence des propriétés en long et en travers; il y a là un phénomène très net d'hérédité.

§ 4. Forgeage et laminage. — Le *forgeage* proprement dit se

fait à la main ou mécaniquement à l'aide de *marteaux-pilons* ou de *presses.*

Le marteau-pilon, opérant par chocs successifs, agit moins à

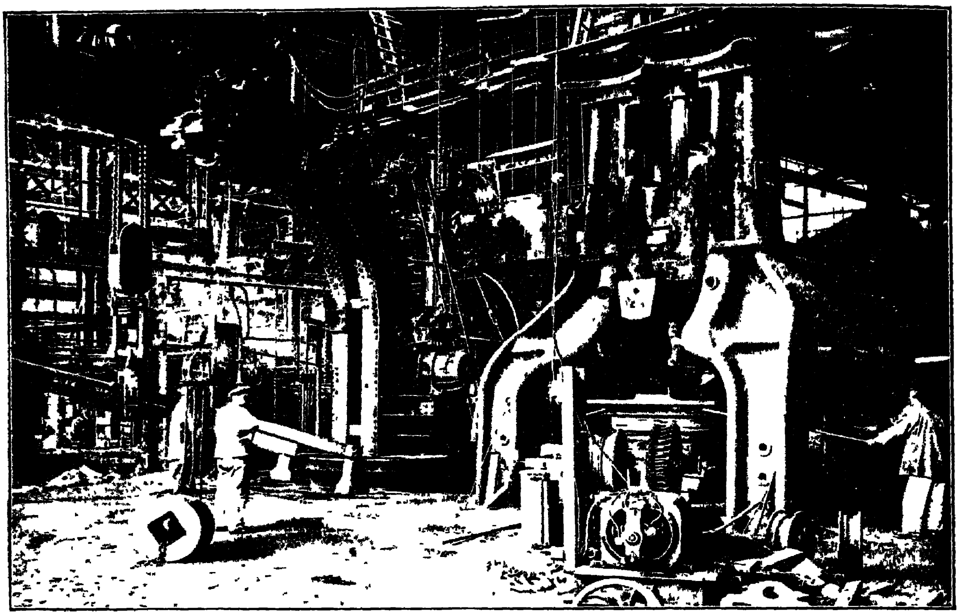


Fig. 102
Forgeage au pilon de 10 tonnes d'une roue de turbine (Usine Saint-Jacques, Montluçon).

cœur que la presse, laquelle exerce une déformation lente sous un puissant effort continu (fig. 102 et 103).

Le *laminage* se fait entre deux cylindres à axes horizontaux, tournant en sens inverse, et entre lesquels on introduit le lingot; après chaque « passe », la distance entre les cylindres est réduite et l'épaisseur du métal diminue ainsi peu à peu.

Un laminoir se compose des cylindres et de la « cage » qui les supporte et permet de régler leur écartement dans un même plan vertical.

Les cylindres ne sont pas toujours cylindriques au sens géométrique du mot; ils sont parfois cannelés; les cannelures, juxtaposées et de dimensions décroissantes, permettant d'obtenir des profils successifs déterminés (fig. 105).

Le nombre des cylindres par laminoir est de deux, trois ou quatre,

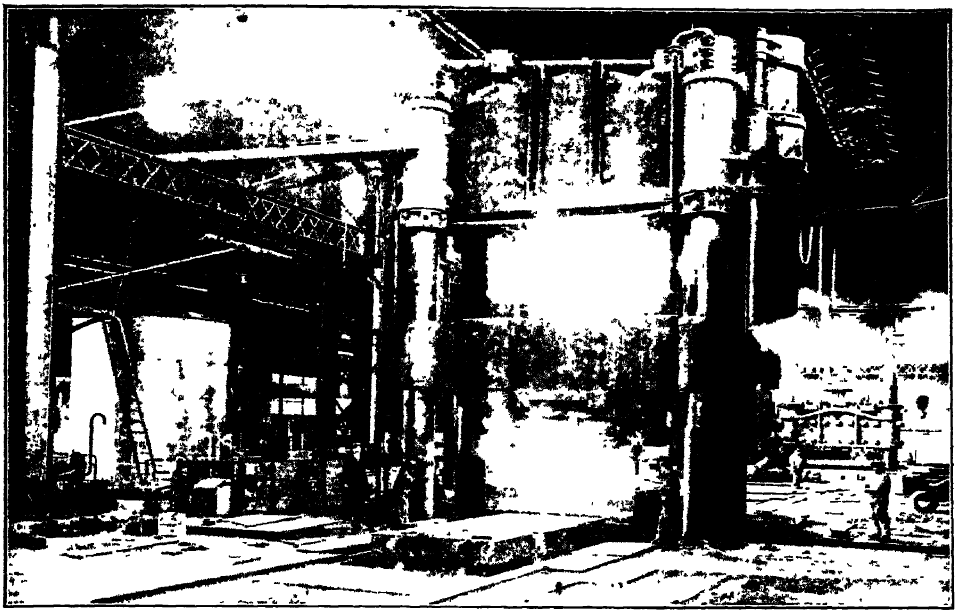


Fig. 103.
Presse de 6.000 tonnes — Châtillon-Commentry

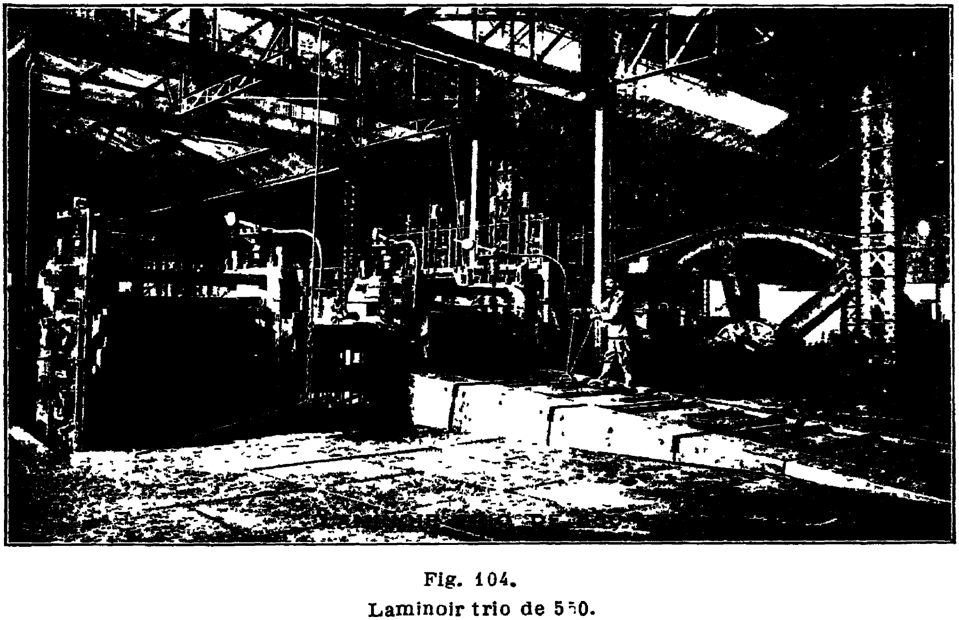


Fig. 104.
Laminoir trio de 550.

d'où les noms de *duos*, *trios*, *double duos*, donnés aux laminoirs

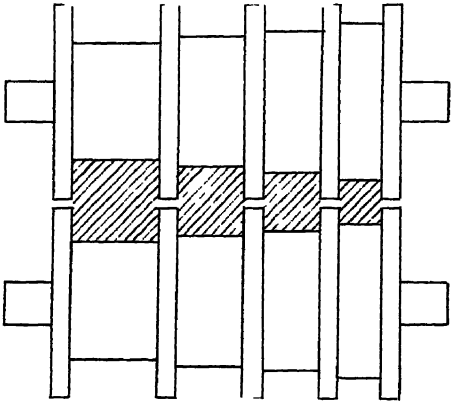


Fig. 105.
Principes du laminoir à cannelures.
Les surfaces hachurées représentent, de gauche à droite, les sections successives données au lingot.

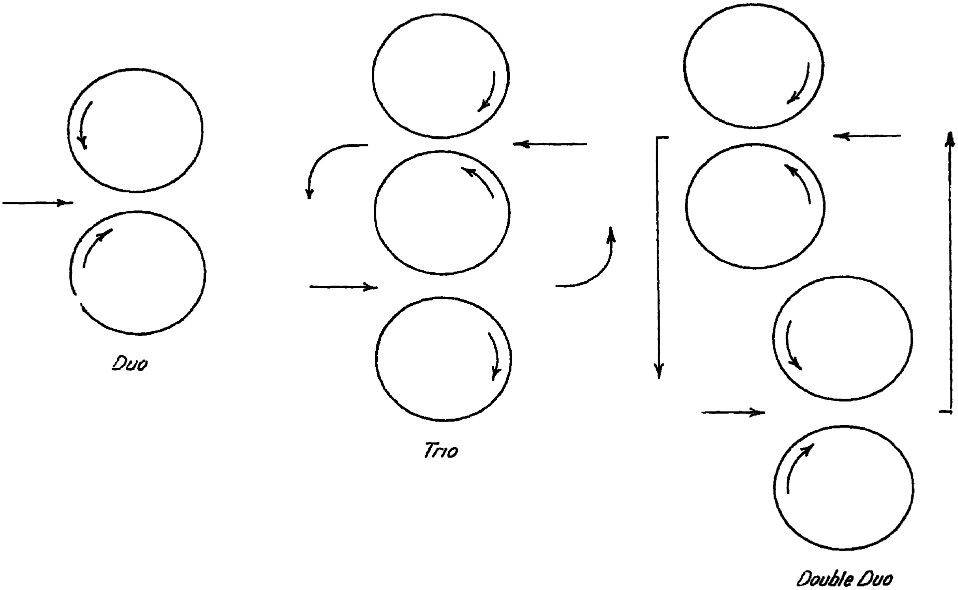


Fig. 106.
Différents types de laminoirs.

(fig. 106); les duos sont réversibles ou continus; le premier type permet de faire passer alternativement le produit d'un côté puis

de l'autre du laminoir; dans les duos continus au contraire, les cylindres tournent toujours dans le même sens, ce qui complique la manutention; par contre, ces derniers permettent le calage de volants sur les arbres d'entraînement, avantage fort important en raison des variations considérables des efforts demandés à l'appareil. Le trio permet une marche continue avec les avantages de manutention du réversible, mais le cylindre central s'use deux fois plus vite que les autres; le double duo, enfin, évite ce dernier inconvénient.

Les laminoirs sont groupés en trains, soit dans le même plan,

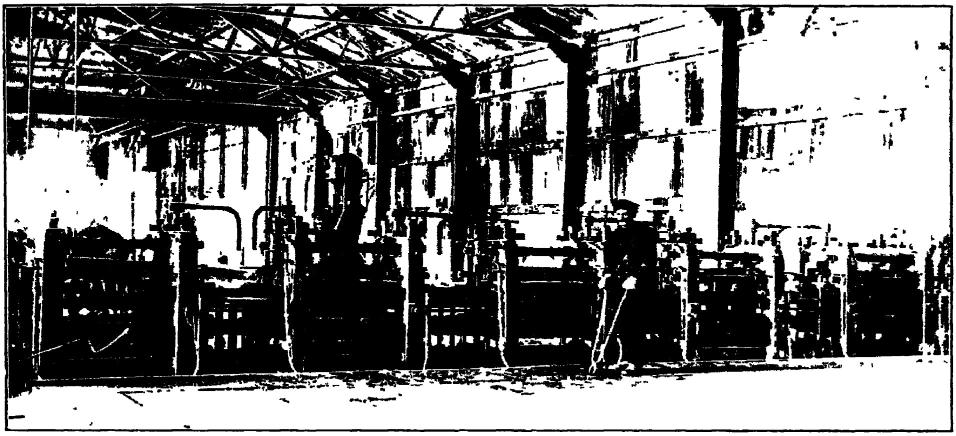


Fig. 107

Laminoir trio de 300 pour aciers spéciaux

soit en file; la première disposition est celle des trains-fils laminant le *fil machine* (c'est-à-dire le fil dans les plus faibles épaisseurs possibles de laminage à chaud), celui-ci passant successivement en serpentant dans les divers laminoirs du train (fig. 107); les trains continus avec des laminoirs disposés en file sont réservés aux produits plus gros et permettent des rendements considérables (fig. 108).

Toutes le commandes de manutention des lingots ou produits déjà transformés, autour des laminoirs, sont mécaniques. Des cisailles automatiques débitent en tronçons, de longueur déterminée, les barres terminées.

Pour le forgeage et le laminage à chaud, on utilise des fours : soit des « pits » pour les lingots déjà chauds, sortes de puits dans lesquels le lingot conserve sa chaleur, soit des fours à réchauffer ou fours poussants caractérisés par une sole inclinée; les produits



Fig 108.

Ebaucheur continu de 350 à 3 cages. Groupe intermédiaire

chargés à la partie haute du plan incliné descendent lentement sur cette sole; quand ils arrivent en bas, ils sont à la température voulue.

Défauts de forgeage. — En dehors des conséquences proprement dites des défauts déjà signalés pour le lingot, nous pouvons avoir :

— des *repliures*, cette appellation expliquant d'elle-même le genre d'accident;

— des *criques de forgeage*, lorsque des efforts locaux ont dépassé la charge de rupture du métal à la température de traitement.

§ 3. Étirage et tréfilage. — L'étirage et le tréfilage se font *à froid;* ils ont pour but l'obtention de barres écrouies ou de fils fins de section bien régulière.

On part de barres laminées à chaud ou de fil machine et on étire ou tréfile par traction à travers une *filière.*

Cette filière est une plaque fixe percée d'un trou du profil voulu;

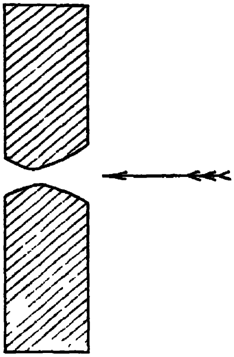


Fig. 109.
Section de filière

ce trou a la forme de deux troncs de cône accolés par leur petite base (fig. 109).

On fait arriver la barre ou le fil par le cône le plus large; on saisit de l'autre côté, à l'aide d'une tenaille, l'extrémité, que l'on a eu soin

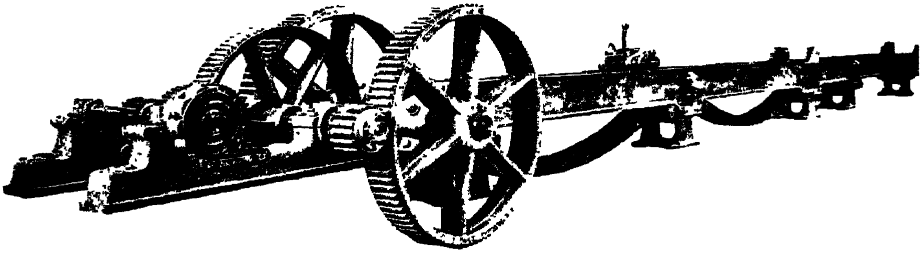


Fig. 110
Banc d'étirage

d'épointer et on tractionne à l'aide d'un banc d'étirage (fig. 110); on fait ainsi passer la barre ou le fil successivement dans plusieurs filières de dimensions décroissantes. Des bobineuses enroulent le fil à la sortie (fig. 111).

Avant de procéder à cette opération, il faut avoir soin de décaper très soigneusement les produits; puis on les graisse pour faciliter

le glissement dans la filière; pour les aciers, on peut, dans le même but, opérer un cuivrage préalable.

Des recuits périodiques sont nécessaires; pour cela, les bottes de

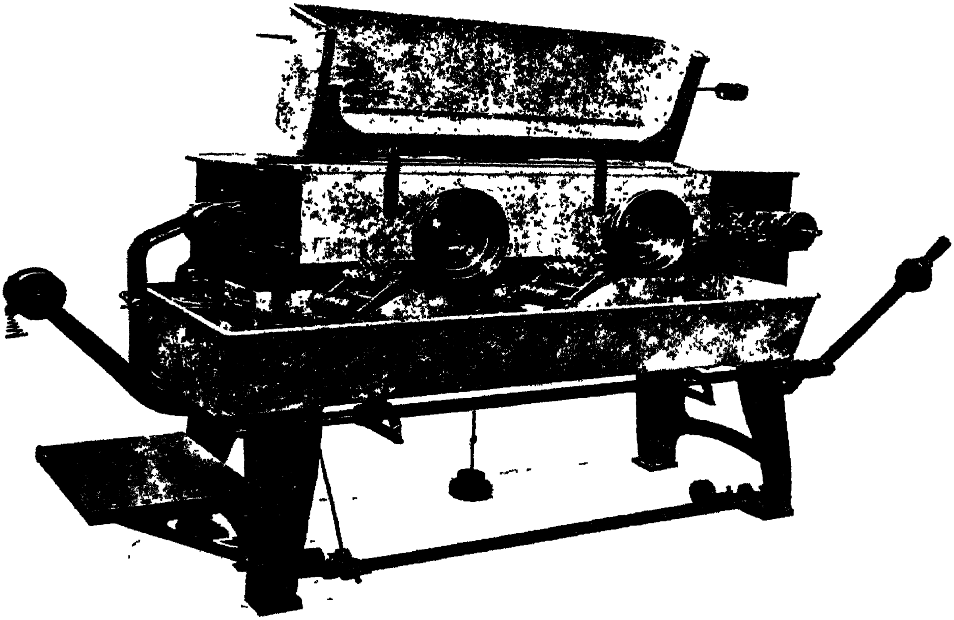


Fig. 111.
Machine à tréfiler multiple pour le cuivre.

fils sont chauffées dans des vases clos afin d'éviter l'altération superficielle du métal par oxydation.

§ 6. Filage a la presse. — On comprime un lingot dans une

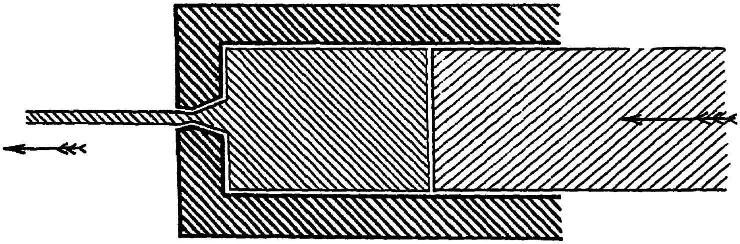


Fig. 112.
Schéma d'une presse à filer

presse dont le fond de cylindre comporte une filière (fig. 112 et 113); le lingot étant à une température rendant possible cette opération.

Ce traitement a de nombreux avantages : réaliser *directement* à partir du lingot une barre ou un fil; donner à cette barre ou à ce

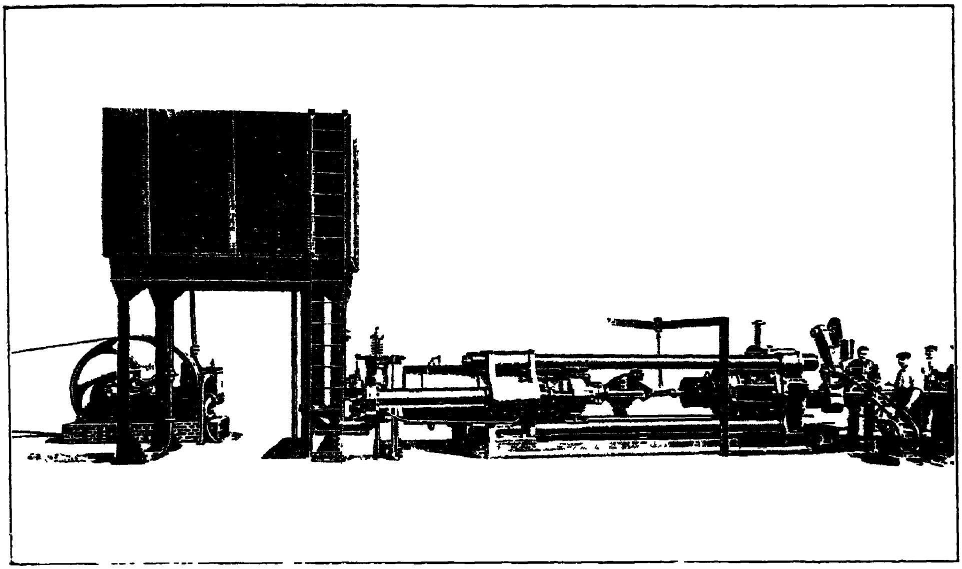


Fig. 113
Presse d'extraction

fil un profil qui peut être fort compliqué; rendre possible le traitement d'alliages ne possédant qu'un faible intervalle de températures optima de travail (interdisant un laminage par suite du refroidissement trop rapide à l'air); on est en effet ici très maître de la température;

Enfin, on n'a pas de chocs comme dans les débuts d'action de cylindres de laminoirs.

Par contre, le traitement exige un appareillage coûteux et les filières ne résistent en général pas bien longtemps à ce travail très dur.

§ 7. Matriçage et estampage. — Dans cette opération, les pièces sont comprimées dans un moule métallique appelé matrice. reproduisant en sens inverse les reliefs à obtenir sur la pièce.

Cette opération peut se faire à froid ou à chaud. Elle est étudiée d'une façon très complète dans le volume II.

§ 8. Emboutissage. — Ici, l'on opère encore à chaud ou à froid.

On part d'une tôle que l'on enfonce à l'aide d'un poinçon dans une matrice creuse de forme appropriée; on utilise pour cela des moutons ou des presses.

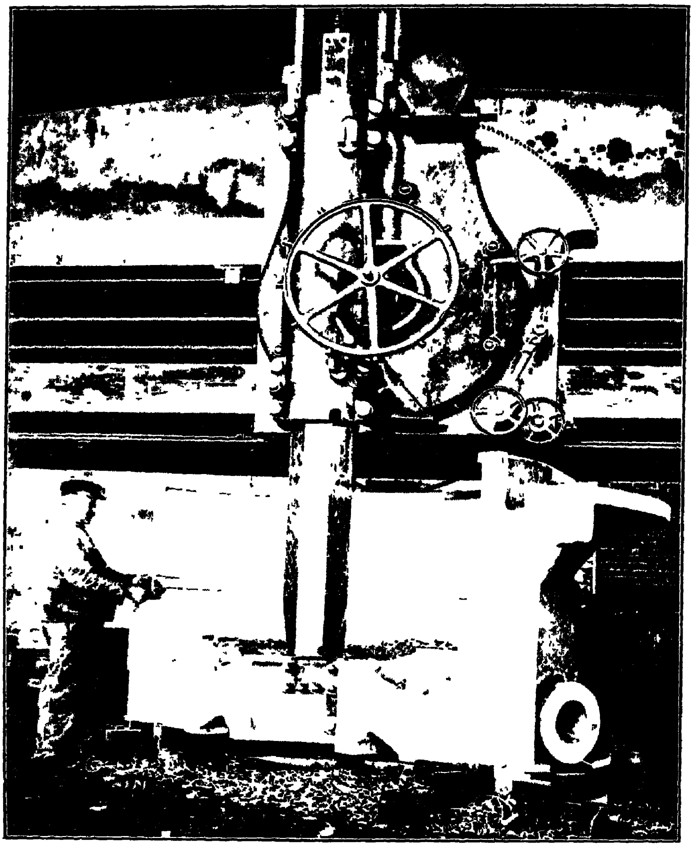


Fig. 114.

Demi-corps de turbine en usinage. Châtillon-Commentry

§ 9. Fabrication des tubes. — Les tubes sont fabriqués par emboutissage ou par cintrage, à chaud ou à froid, d'une bande

de tôle sur un mandrin avec soudure des bords, ou encore par laminage sur mandrin d'une ébauche percée, grâce au procédé de laminage Mannesmann; ce procédé utilise un laminoir très spécial dont les cylindres ont des axes inclinés sur la direction de progression du tube; le métal est travaillé suivant des efforts en quelque sorte hélicoïdaux.

§ 10. TRAVAIL SUR MACHINES-OUTILS. — Enfin, tous les travaux sur machines-outils participent des traitements mécaniques (fig. 114); nous ne décrirons pas ici les divers types de machines-outils. Bornons-nous à signaler l'importance de la nature des outils et de leur traitement thermique, souvent fort délicat (aciers à coupe rapide); signalons également l'importance de certaines additions dans les alliages, en vue de leur plus grande facilité d'usinage (particules très fines de plomb, non miscible, dans le laiton de décolletage, et facilitant la brisure des copeaux) ou de traitements thermiques affinant la structure et empêchant un métal trop malléable et à grains trop gros, de « bourrer » l'outil.

CHAPITRE XI

TRAITEMENTS THERMIQUES

Nous ne reviendrons pas sur les considérations déjà indiquées pour la *surchauffe* et la *brûlure ;* notons simplement que la théorie du ciment amorphe, énoncée à propos de l'écrouissage, a encore quelque raison d'être ici : en cas de surchauffe, il peut y avoir début de fusion de ce ciment intercristallin amorphe et ceci d'autant mieux qu'il renferme plus d'impuretés, celles-ci abaissant sa température de ramollissement.

1. Trempe.

But de la trempe. — Le but de la trempe est d'obtenir par un traitement thermique courant une modification des propriétés, modification directement utilisable, ou modification devant être corrigée par un traitement ultérieur de revenu.

La trempe consiste en un chauffage permettant d'obtenir un état physico-*chimique différent* de celui normalement stable à la température ordinaire, suivi d'un refroidissement à une vitesse suffisante pour *empêcher totalement ou partiellement* la variation inverse de structure au refroidissement.

Facteurs de trempe. — Les facteurs intervenant dans cette opération sont :

1° La *température de chauffage* qui définit, grâce au diagramme, l'état physico-chimique théorique de départ lorsque commence le refroidissement.

Nous disons « théorique » parce que la réalisation de cet état n'est pas instantanée; la durée nécessaire pour son obtention varie suivant les cas pratiques.

Il faut donc adjoindre le facteur *temps* de chauffage pour avoir une définition réelle et complète de cet état de départ.

2° La *vitesse de refroidissement*, dépendant d'un grand nombre de facteurs : température initiale, caractéristiques physiques et dimensions de la pièce; température et caractéristiques analogues du milieu dans lequel s'effectue le refroidissement.

On peut d'ailleurs ne pas réaliser une loi de refroidissement régulière.

Dans certains cas, on adopte une descente assez complexe avec des arrêts, ou des ralentissements ou accélérations dans certains intervalles.

Au point de vue pratique, il faut aussi noter que les gains et pertes de température au chauffage et au refroidissement ne se font pas de manière homogène en tous les points de la pièce lorsque celle-ci est entièrement plongée dans le milieu de chauffe ou de trempe : le cœur met plus longtemps que la surface à effectuer son évolution.

Quelquefois on crée même volontairement des hétérogénéités en chauffant ou refroidissant différemment certaines parties.

Effets de la trempe. — a) *Modification structurale.* — La trempe provoque une modification physico-chimique.

Les structures nouvelles dépendent évidemment des alliages étu-

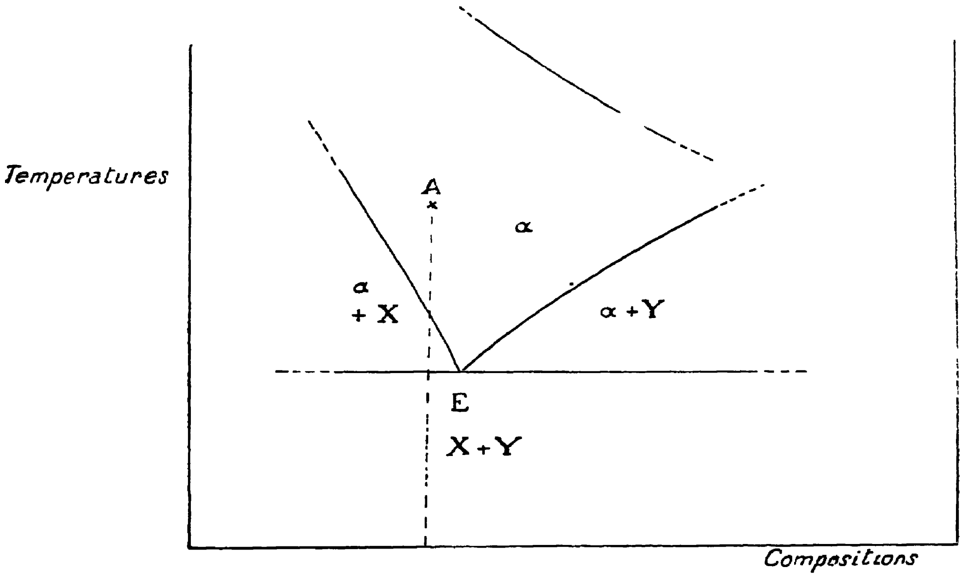


Fig. 115

diés et des facteurs de l'opération; il est donc difficile de donner des indications d'ordre général sur les résultats de ce traitement.

Il y a néanmoins un cas assez fréquent qui est le suivant : le diagramme présente un eutectoïde E comme l'indique la figure 115 : au-dessus de l'eutectoïde se trouve un domaine de solution solide α; au-dessous une zone à deux constituants X et Y, qui s'étend jusqu'à la température ordinaire.

Si l'on chauffe un alliage A dans la zone α et qu'on le trempe, on *peut* obtenir les effets suivants :

1° maintien à température ordinaire de la structure stable à chaud; la trempe est dite austénitique car elle maintient le constituant solution solide dit *austénite* (1) : on a une structure cellulaire de solution homogène (fig. 116); c'est ce qu'on appelle parfois une *hypertrempe* (qui n'est en somme qu'une trempe complète);

2° production d'un constituant de transition, et on en distingue généralement deux, la *martensite* et la *troostite* (1).

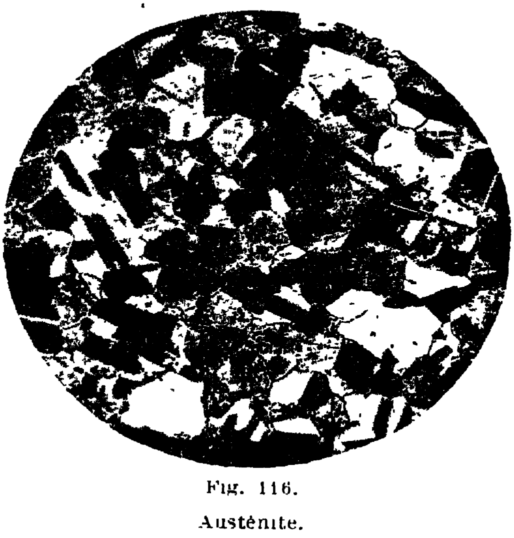


Fig. 116.

Austénite.

Après l'austénite, on a, pour une trempe moins complète que la précédente, une structure de *martensite*, structure très fine, souvent

(1) Les termes « austénite », « martensite, « troostite », plus spécialement réservés aux alliages « fer-carbone » font ici l'objet d'une généralisation.

aiguillée; ces aiguilles étant orientées suivant trois directions parallèles aux côtés du triangle équilatéral (fig. 118);

pour une trempe encore moins complète et avant la structure



Fig. 117.
Martensite, avec aiguilles foncées, sur fond austénitique clair



Fig 118
Martensite.

stable X + Y. on a la *troostite*, structure très attaquable que l'on

suppose être un assemblage d'une finesse extrême, colloïdale, des deux constituants X et Y, lesquels seraient déjà séparés;

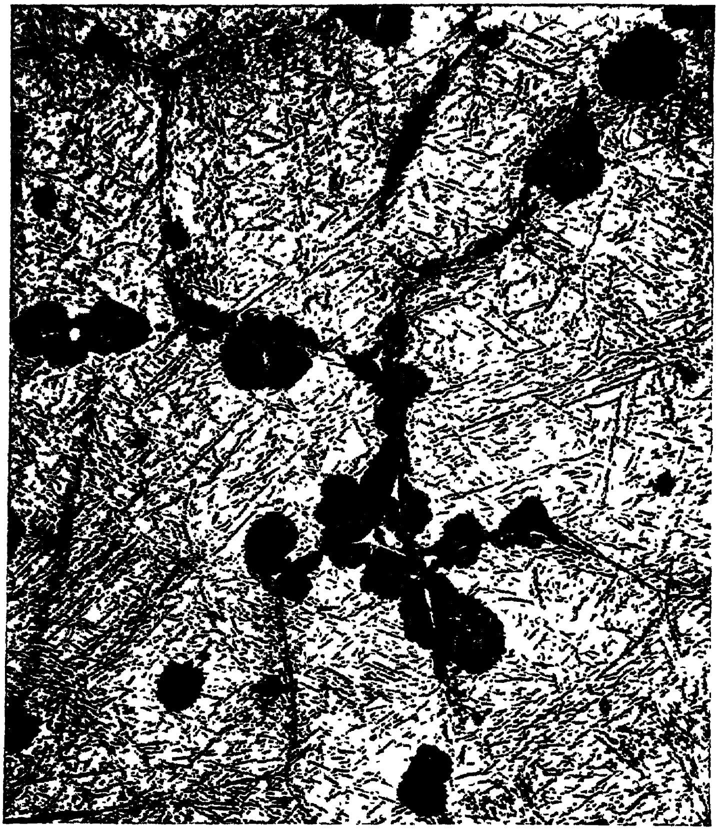


Fig. 119
Troostite en rognons foncés sur fond martensitique aiguillé

on peut avoir aussi des structures mixtes entre les structures ci-dessus (fig. 117 et 119).

b) *Rejet des points de transformation.* — Lorsqu'on passe par une transformation Ac au chauffage (fig. 120), il est rare que la transformation inverse au refroidissement se produise exactement à la même température; la vitesse de refroidissement a toujours une influence plus ou moins forte; elle provoque le rejet du point de transformation vers une température plus basse et cela avec une

intensité plus ou moins grande, dépendant de l'alliage et des conditions de trempe.

Si le point de transformation est rejeté au-dessous de la tempé-

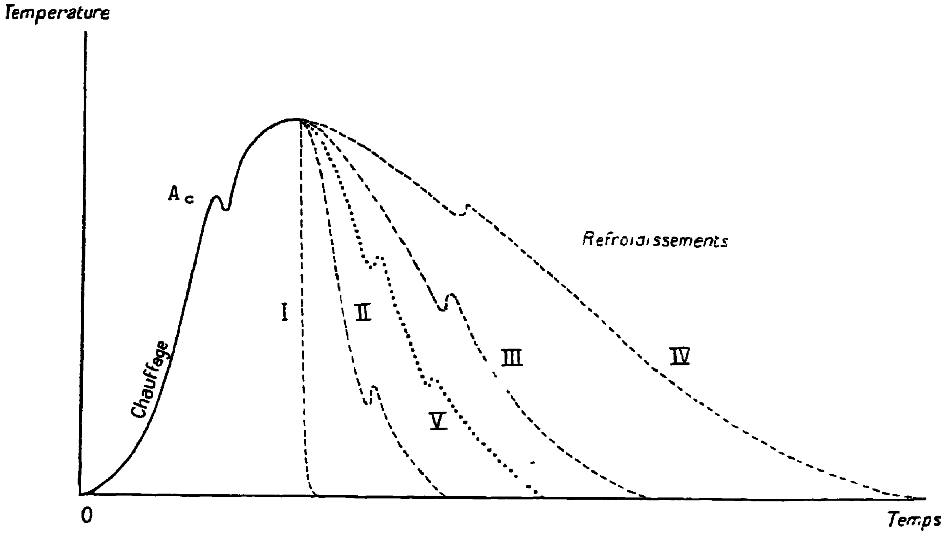


Fig. 120

rature ordinaire (fig. 120-I), la transformation ne se produit plus : on a maintien de la structure stable normalement à chaud ; c'est l'*austénite*.

Si le point de transformation est rejeté au-dessus de la température ordinaire, on a la production de martensite ou de troostite suivant l'importance décroissante de ce rejet (II et III).

Si cette importance est très faible on a la structure de recuit indiquée par le diagramme et normalement stable à la température ordinaire (IV).

Le phénomène est parfois encore plus complexe : on peut avoir dédoublement en même temps que rejet du opint de transformation (fig. 120-V) ; nous le verrons pour certains aciers.

c) *Tension de trempe*. — Enfin, la trempe a pour effet la production de tensions internes dans les pièces.

Ces tensions ont deux origines différentes :

d'abord, le refroidissement, généralement rapide, dû à la trempe, est plus brusque en surface des pièces qu'à cœur.

Cette hétérogénéité de vitesse de refroidissement est surtout

fonction de la conductibilité calorifique de la pièce et de sa masse, et des caractéristiques du milieu de trempe.

Lorsque le coefficient de dilatation du métal sera élevé, on pourra avoir, de ce fait, des tensions déjà très importantes;

mais une autre cause réside dans les transformations internes lorsqu'il y en a :

Supposons un alliage présentant une transformation aux environs d'une certaine température; si l'on étudie sa variation de volume pendant le chauffage, nous constatons presque toujours une contraction partielle au moment du passage de la transformation, puis la dilatation reprend; au refroidissement, on a le phénomène inverse : contraction initiale, dilatation passagère au moment de la transformation (à moins que celle-ci ne soit supprimée), contraction finale.

Considérons maintenant un bloc de cet alliage que nous chauffons : la contraction se produit au chauffage au moment où l'on passe la transformation; si ce bloc est un peu gros et le chauffage pas trop lent, la transformation se produira d'abord sur la surface chaude, puis elle se propagera jusqu'au cœur, suivant le déplacement de la surface isotherme correspondant à la température de transformation.

Il y aura donc une contraction passagère qui se déplacera de la surface au cœur pendant que tout le reste du bloc, de part et d'autre de cette contraction, se dilatera; on conçoit parfaitement qu'il en résulte des tensions.

Mais si la température de transformation au chauffage est un peu élevée, la plasticité du milieu absorbera ces tensions.

Au contraire, au refroidissement, le phénomène pourra être fort dangereux : la transformation pourra en effet être rejetée à une température basse et le métal ne sera pas assez chaud pour s'écouler sous l'effet de la dilatation cernée par des contractions.

De plus, cette vague dilatée se propage vers l'intérieur avec une vitesse accélérée, puisque la température de transformation se relèvera en allant vers le cœur, la vitesse de refroidissement allant progressivement en décroissant vers l'intérieur; on aura donc un effet de tensions extrêmement brutal, effet encore aggravé, s'il y a dédoublement du point de transformation.

La résistance de la pièce pourra être insuffisante vis-à-vis de ces tensions, et la pièce cassera; il y aura *tapure* de trempe.

Ces tapures pourront d'ailleurs ne se révéler qu'au bout d'un certain temps, sous une influence extérieure comme une légère variation de température, un effort mécanique, ou encore le « season cracking » précédemment décrit à propos de l'écrouissage et de la corrosion.

Enfin, les « déformations » de trempe n'ont pas d'autre origine : elles proviennent d'un dépassement de l'élasticité du métal par les efforts internes.

Ces efforts internes ont d'ailleurs une action *directe* sur la structure; ils dépendent de la vitesse de refroidissement : par exemple un acier qui, dans certaines conditions de trempe et sans efforts internes, deviendrait austénitique, peut donner de la martensite si les tensions prennent une valeur suffisante.

Cette action est tout à fait indépendante de celle des compositions de métal et des facteurs extérieurs de trempe; elle opère seulement par la variation de pression qu'elle engendre; c'est un degré supplémentaire de variance.

Pénétration de la trempe. — Signalons une dernière notion de trempe : celle de la *pénétration.*

Suivant les alliages, suivant les caractéristiques du traitement, on a un effet de trempe plus ou moins homogène en profondeur dans les pièces.

Par exemple, il est bien connu que les aciers au chrome prennent mieux la trempe en profondeur que les aciers ordinaires.

Il est facile de comprendre que les aciers n'exigeant qu'une faible vitesse de refroidissement pour prendre une trempe forte, seront mieux trempés en profondeur que les autres.

De plus, le phénomène ci-dessus décrit sur la propagation de la transformation vers le cœur de la pièce interviendra également.

Influence de la trempe sur les propriétés. — Quelles seront les propriétés de la trempe ?

Elles dépendront évidemment, comme la structure, de la composition de l'alliage et des caractéristiques du traitement; elles seront en liaison naturellement très étroite avec cette structure.

Lorsqu'on sera dans les cas austénite, martensite, troostite, on pourra dire, d'une manière générale, que les structures austénitiques sont résilientes et de dureté moyenne, les martensitiques,

peu résilientes et de grande dureté, les troostitiques, assez résilientes et d'une dureté appréciable mais nettement inférieure à celle des structures martensitiques.

On voit dès maintenant que la trempe procure suivant les cas des duretés absolument variables et ne produit pas toujours des augmentations de dureté comme on a l'habitude de le dire.

Les propriétés physiques et chimiques seront influencées également, à savoir : le magnétisme, la densité, la diffraction aux rayons X, la résistance à la corrosion, etc.

Elles devront faire l'objet d'une étude de variation dans chaque cas particulier.

Pratique de la trempe. — Nous distinguerons :

a) Les méthodes de trempe;

b) Les modes de chauffage;

c) Les modes de refroidissement.

a) *Méthodes de trempe.* — Généralement, la pièce, après avoir été portée à la température voulue, est immergée rapidement et en entier dans l'un des milieux de refroidissement que nous énumérerons plus loin. Mais on réalise parfois des variantes.

Trempe incomplète. — On se borne à tremper une partie seulement de la pièce dans le milieu de refroidissement, de façon à donner des propriétés différentes aux parties immergée et émergée.

On peut également chauffer seulement la partie de la pièce que l'on veut tremper, puis plonger la pièce en totalité dans le milieu de refroidissement. Ces procédés sont délicats à mener à bien.

Trempe double. — Elle consiste à refroidir la pièce en deux temps : d'abord dans un premier milieu, puis, lorsqu'on a atteint une certaine température, dans un autre milieu. Cela revient à adopter deux vitesses successives de refroidissement dans les deux intervalles envisagés.

Quelquefois, on opère comme suit : la première partie du refroidissement est conduite rapidement, puis on sort la pièce du bain et on finit par un refroidissement très lent; le cœur de la pièce qui était encore très chaud, diffuse alors de la chaleur vers la surface qui se réchauffe, et l'on a ainsi un self-revenu des régions externes.

Trempe au jet. — Dans la trempe au jet, ou par aspersion, on projette sur certaines parties de la pièce un ou plusieurs jets violents du milieu de trempe. On a ainsi un refroidissement intense grâce à ce milieu constamment renouvelé.

D'autre part, les parties non exposées aux jets se refroidissent plus lentement et l'on peut ainsi réaliser une hétérogénéité voulue des propriétés dans la pièce.

b) *Mode de chauffage.* — Les fours utilisés pour le chauffage

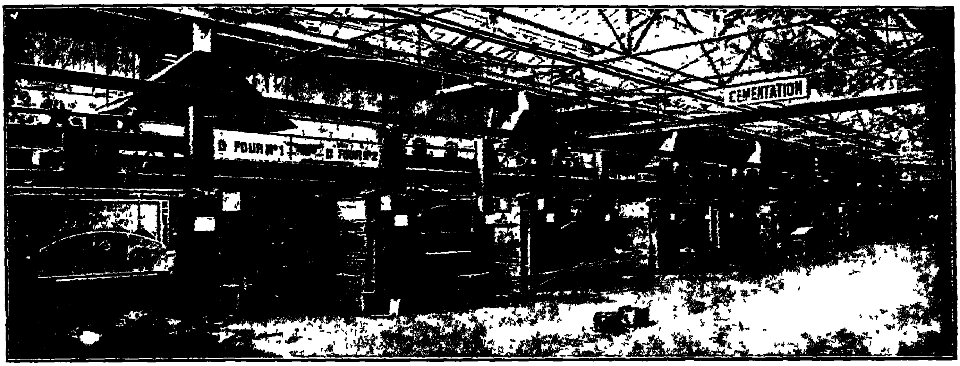


Fig. 121.
Batterie de fours à gazogène pour traitements thermiques.

avant trempe sont de modèles extrêmement divers; signalons rapidement :

les fours à combustible solide, de moins en moins employés;

les fours à gaz, gaz de ville, gaz de gazogène, gaz pauvre (fig. 121 et 122);

les fours à combustibles liquides;

les fours électriques, généralement à résistances (fig. 123).

Disposition des pièces. — Dans ces différents types, les pièces sont disposées soit sur des soles, soit dans des moufles; elles sont parfois placées sur des transporteurs à mouvement continu, ce qui simplifie les manutentions.

Il faut veiller à la bonne construction de ces fours, de façon que la température aux différents points de la chambre de chauffe soit aussi homogène que possible.

Atmosphère des fours. — L'atmosphère de ces fours a une très grosse importance en raison de son action chimique, à température élevée, sur le métal.

Pour les pièces en acier, il faudra avoir des atmosphères plutôt

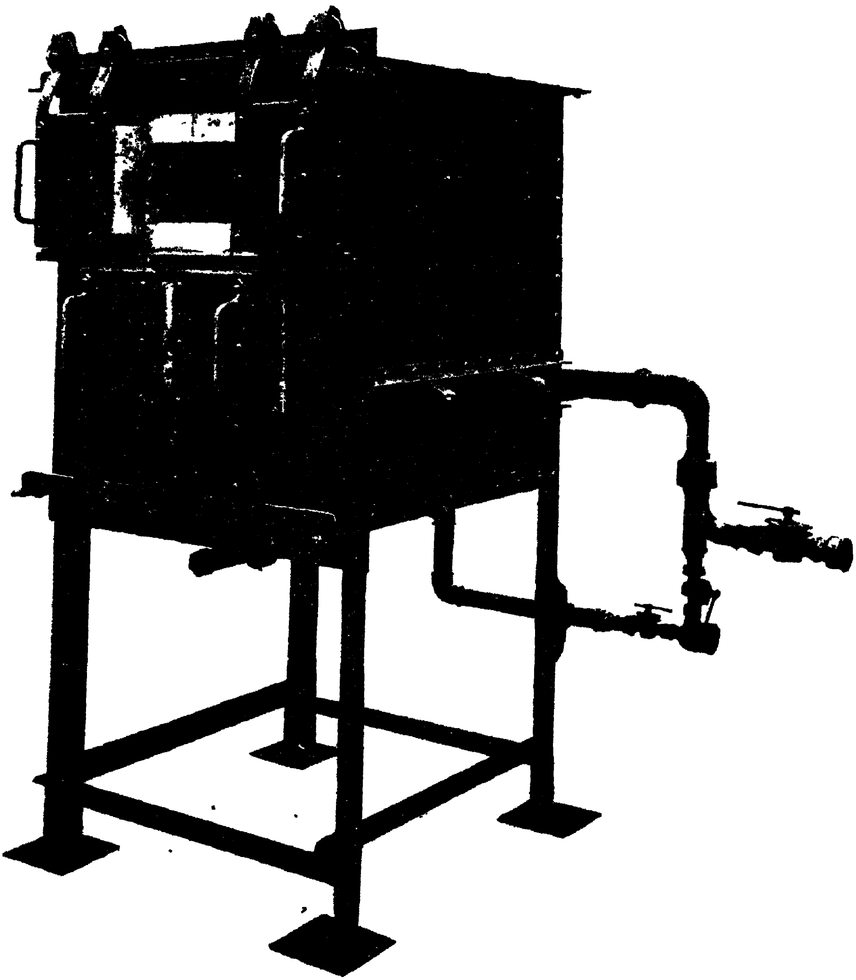


Fig. 122.
Four Meker à deux soles pour la trempe des aciers à coupe rapide.

un peu réductrices, afin d'éviter les décarburations superficielles; pour le laiton, les atmosphères oxydantes permettent au contraire d'empêcher la volatilisation du zinc en surface.



Fig. 123.
Four électrique Hagan pour traitements thermiques — Résistances intérieures
Chargement à sole mobile sur wagonnet — Joints de table. — A droite, caisse prête
à être chargée

Lorsqu'on veut absolument éviter de telles actions de corrosion, on chauffe les pièces en boîtes ou en caisses soigneusement lutées;

quelquefois même, on crée dans ces récipients une atmosphère bien déterminée, ou bien on y met de la limaille de fonte.

Bains de chauffage avant trempe. — Un autre mode de chauffage

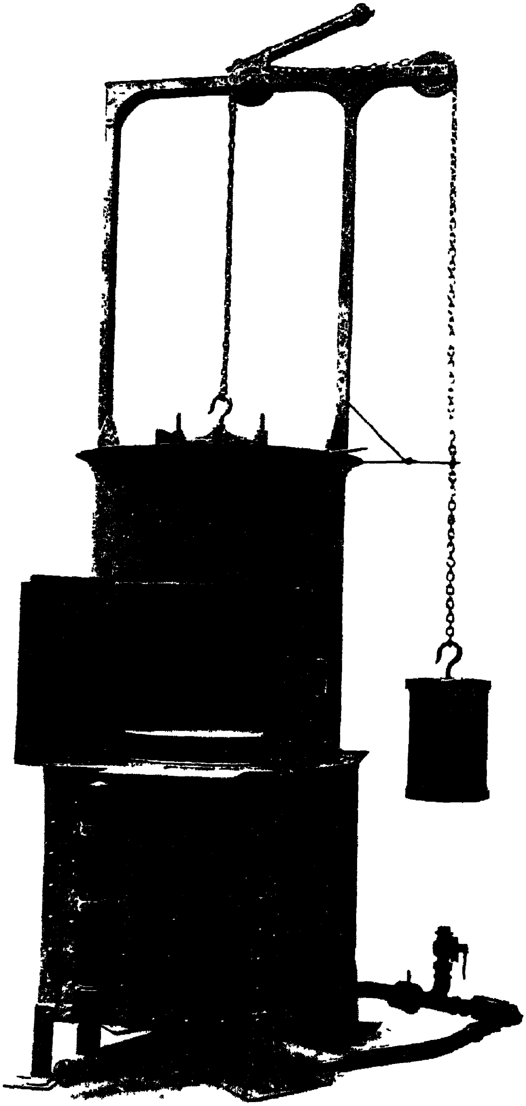


Fig. 124.
Bain de sels Meker.

très employé est le bain liquide : on le place dans une cuve, habituellement métallique, chauffée au gaz (fig. 124), ou à l'huile, ou électriquement, et on y immerge les pièces; on obtient ainsi un chauffage rapide et très régulier et, avec un bain convenablement choisi, les pièces restent tout à fait inattaquées.

Les principaux milieux utilisés sont :

des métaux ou alliages assez fusibles, en particulier le plomb entre les températures de 350 et 900°;

des sels fondus :

mélange d'azotite de sodium et d'azotate de potassium par parties égales pour les températures entre 150 et 500° (1);

chlorure de potassium de 750 à 1.000°;

chlorure de baryum de 1.000 à 1.300°.

Lorsqu'on veut absolument éviter toute décarburation, au risque d'une légère carburation superficielle, on emploie un mélange de 60 % de cyanure de sodium et 40 % de carbonate de sodium.

On ne connaît pas de bain industriel pratique, en dehors du plomb, pour l'espace de température entre 500 et 750°; le mélange de 45 % de chlorure de sodium et 55 % de chlorure de potassium fond bien vers 600°, mais il adhère facilement aux pièces au-dessus de ce point de fusion et empêche un contact intime de ces pièces avec le milieu de refroidissement.

Les huiles, surtout minérales, permettent de dépasser quelque peu 250°.

Rappelons en terminant l'importance *primordiale* d'un contrôle précis de la température de trempe.

c) *Milieux de refroidissement.* — Nous avons :

l'eau, à divers degrés de température, quelquefois additionnée de sels solubles, comme le chlorure de sodium, ayant pour but d'augmenter la régularité du refroidissement;

le pétrole;

des huiles;

l'air, tranquille ou comprimé sous forme de jet;

ou alors des bains à température plus élevée, du genre de ceux que nous avons indiqués pour le chauffage.

---

(1) Il faudra éviter avec soin de mélanger à ce bain un sel comme un cyanure ou un sel suroxygéné comme un nitrate, ce mélange étant explosif et risquant de provoquer des accidents très graves.

Tous ces liquides sont placés dans des bacs. Il est bon, lorsqu'on trempe de nombreuses pièces, de bien maintenir leur température par un dispositif adéquat.

Nous rappelons ici la trempe au jet, employant des dispositifs dont la forme varie avec le genre de pièces, et qui utilisent un des milieux de refroidissement ci-dessus.

§ 2. **Revenu.**

But du revenu. — Le revenu est un traitement complémentaire de la trempe; son but peut être triple :

1° Disparition totale ou partielle des tensions internes de trempe;

2° Modification mais non suppression totale des propriétés, souvent trop extrêmes, dues à la trempe, et retour vers *un ensemble* de caractéristiques mieux adapté aux exigences d'emploi;

3° Homogénéisation des propriétés dans toute la masse d'une pièce trempée.

Mais, dans ces trois cas, il est bien entendu que nous arrivons à un état structural encore labile, sans quoi, si l'on atteignait l'état stable, on serait dans le cas du recuit, limite extrême du revenu.

Facteurs du revenu. — La *température de chauffage*, la *vitesse de refroidissement*, le *temps de chauffage* sont encore ici les facteurs principaux de l'opération.

Les deux premiers ont la prépondérance quand il s'agit de faire disparaître les tensions internes.

Dans les autres cas, au contraire, c'est la vitesse de refroidissement qui passe au second plan, la température et le temps de chauffage devant exercer une influence primordiale.

Les températures de revenu sont, en effet, toujours inférieures à celles de trempe, puisque le but est d'obtenir un résultat intermédiaire entre ceux de trempe et de recuit.

Lorsqu'il y a transformation au chauffage, on reste, dans le revenu, en deçà de cette transformation. L'allure du refroidissement après revenu n'a donc qu'une faible influence (cas des tensions internes mis à part).

Parfois le revenu s'effectue tout seul à la température ordinaire et ceci avec une vitesse néanmoins appréciable, c'est le cas de l'alliage léger à haute résistance (type duralumin).

Effets du revenu. — a) *Destruction ou atténuation des tensions de trempe.* — En ce qui concerne les *tensions internes de trempe*, dans la presque totalité des cas, il est presque toujours inutile, pour obtenir leur disparition, d'atteindre les températures de trempe ou de recuit.

Pour les aciers ordinaires, par exemple, dont le premier point de transformation au chauffage est voisin de 700°, les tensions internes commencent à disparaître à de très basses températures, et leur suppression est quasi complète vers 600°; lorsque le but du revenu est cette disparition des tensions, il faut avoir soin de faire suivre *immédiatement* l'opération de trempe de celle du revenu, de manière à éviter les risques de tapure.

Mais n'oublions pas qu'ici la vitesse de refroidissement après revenu a de l'importance; un arrêt brusque de revenu à l'eau peut réintroduire des tensions dans les pièces.

b) *Modifications structurales.* — Au point de vue *structural*, les modifications produites par le revenu conduisent parfois à la précipitation à l'état extrêmement divisé — certains disent, pour faire image, *colloïdal* — d'un constituant maintenu en solution instable par trempe et qui, par recuit, s'isolerait en masses importantes.

Ces précipitations ultrafines donnent souvent des améliorations bien nettes, surtout de la résistance et de la dureté, par rapport à la trempe et au recuit. Souvent même les allongements et la résilience conservent ou acquièrent une valeur importante.

D'autres fois, le revenu procure des états nouveaux, différents de ceux de trempe et de recuit : *osmondite*, *sorbite*, certains de ces états n'étant très probablement que des précipitations sous un état ultra-divisé de certains constituants stables, comme nous l'avons déjà indiqué ci-dessus.

L'un des effets les plus fréquents de ces nouvelles structures est l'amélioration de la résilience devenue trop faible après une trempe martensitique.

Mais il faut bien se garder de généraliser cette théorie, pas plus que celle de la dureté de trempe, dont nous avons déjà parlé.

Il arrive, par exemple, que l'on cherche pour l'emploi une structure martensitique très dure et qu'on l'obtienne par revenu, après une trempe austénitique plus douce qui a permis l'usinage.

Il faut signaler aussi certaines fragilités anormales de revenus dont il sera parlé dans le volume de sidérurgie.

c) *Retour à l'homogénéité.* — Le revenu fait disparaître les hétérogénéités créées par la trempe dans une pièce. Ce traitement est nécessaire pour revenir à l'homogénéité; ceci étant en liaison étroite avec les considérations précédentes.

Pratique du revenu. — La pratique du chauffage et du refroidissement, est analogue à celle indiquée pour la trempe; nous n'y reviendrons pas.

Signalons cependant le cas du revenu à température ordinaire ou à température peu élevée, dans l'eau bouillante par exemple.

Rappelons que lorsqu'il s'agit d'adoucir une pièce trempée, de faire disparaître ses tensions, le revenu doit succéder, sans interruption aucune, à la trempe.

Les méthodes de revenu sont influencées d'abord par la vitesse à observer pour le refroidissement, ensuite par le fait que tout ou seulement partie de la pièce doit donner lieu à revenu.

Il arrive, en effet, parfois que des revenus incomplets soient nécessaires afin de maintenir dans certaines parties de la pièce, les propriétés de trempe.

Rappelons encore que certains procédés de trempe, précédemment indiqués, comportent en eux-mêmes un revenu final.

Nous signalerons, pour terminer, la méthode de revenu dûe à M. Henry Le Chatelier et applicable aux petites pièces pour lesquelles le chauffage peut cesser dès que la température de revenu est atteinte.

Elle consiste à placer les pièces dans un métal, alliage ou bain salin fondant à la température exacte du revenu; le bain est liquide et maintenu à une température légèrement supérieure au point de fusion; lorsqu'on plonge les pièces froides, le produit du bain se solidifie à leur contact et les enrobe d'une sorte de carapace. Le tout s'échauffe peu à peu, la masse liquide du bain et le chauffage fournissant des calories.

Finalement la carapace fond, indiquant ainsi que les pièces atteignent la température désirée; on les retire aussitôt.

§ 3. **Recuit.**

Buts du recuit. — Les principaux buts du recuit sont les suivants :

destruction totale d'un effet de trempe, ou d'un effet de trempe et de revenu, et stabilisation physico-chimique des structures;

destruction totale ou partielle de l'écrouissage, et des tensions internes provenant des traitements mécaniques à froid;

homogénéisation des produits bruts de coulée lorsque ceux-ci ont une composition hétérogène dans chaque grain;

régénération des produits surchauffés par affinage du grain et de la structure.

Tous ces buts ont déjà été étudiés; nous n'y reviendrons pas.

Notons seulement que dans le premier cas, on pourra avoir à franchir des lignes de transformation à l'état solide.

Facteurs du recuit. — Ce sont la température de chauffage, le temps de chauffage et la vitesse de refroidissement.

1° La *température de chauffage* est conditionnée par le but cherché, (buts du recuit définis plus haut).

2° Le *temps de chauffage* a son influence, comme dans le cas de la trempe. Il permet l'obtention totale de la structure stable à la température de chauffage, cette structure n'étant pas, en général, réalisée instantanément.

3° La *vitesse de refroidissement* agit sur la grosseur des grains et la répartition des constituants stables.

Elle est toujours inférieure à celle d'apparition du phénomène de trempe. Cette *vitesse limite* entre trempe et recuit varie considérablement avec les alliages.

Elle est infinie pour les alliages ne prenant pas la trempe, c'est-à-dire pour ceux dont la constitution physico-chimique ne change pas dans toute la zone du solide.

Elle est grande pour les alliages présentant des transformations de faible envergure, c'est-à-dire des modifications structurales où entrent en jeu seulement de faibles quantités des constituants d'addition; c'est le cas des aciers extra-doux dont la teneur en carbone est infime. En revanche, cette vitesse limite peut prendre des valeurs insignifiantes, pour les alliages très sensibles au phénomène de trempe : il arrive alors que pour obtenir la réalisation intégrale de certaines transformations, on soit obligé d'abaisser la vitesse de refroidissement à 2 ou 3° C. par heure : pour les fontes malléables américaines par exemple, le refroidissement, depuis 780° à la température ordinaire, doit suivre une courbe déterminée et dure en tout soixante-douze heures.

On peut dire, d'une manière générale, qu'il est bon de ne pas

trop abaisser la vitesse de refroidissement du recuit au-dessous de sa limite supérieure, sans quoi le grain grossit, les différentes phases se rassemblent et les propriétés mécaniques diminuent, en particulier la résilience et la dureté; c'est pourquoi les aciers extra-doux ne doivent pas être refroidis lentement dans des fours fermés et éteints, mais à l'air ou à l'eau afin d'affiner le grain et la structure.

On voit qu'il faut prendre garde aux appellations usuelles d'atelier : dans ce dernier exemple, le métal pourrait être dit *trempé*, pourtant c'est la structure stabilisée qui est produite et il s'agit bien d'un recuit.

Il faut cependant, en s'engageant dans cette voie, ne pas risquer la production de tensions internes dangereuses dues à la seule contraction du refroidissement, abstraction faite par conséquent des tensions de transformations, ces transformations étant, dans le cas envisagé, nulles ou de faible amplitude.

Dans les cas moyens, il faudra adopter une solution de juste milieu afin d'obtenir une structure aussi fine que possible, et sans tensions.

On sera parfois obligé, pour affiner le grain et la répartition des constituants, d'adopter une vitesse de refroidissement assez grande (tout en restant dans les limites du recuit).

Cette vitesse sera génératrice de tensions. Mais alors on fera suivre ce traitement d'un second chauffage à basse température (ayant des caractéristiques analogues à celle d'un revenu. Ce second chauffage ne changera rien à la structure, mais fera disparaître au moins une partie des tensions internes.

Pratique du recuit. — La pratique du recuit est semblable à celle déjà exposée pour la trempe et le revenu.

On peut pratiquer des recuits complets ou des recuits partiels, ceux-ci permettant de maintenir dans certaines parties des pièces des états écrouis, ou des structures encore instables.

CHAPITRE XII

TRAITEMENTS CHIMIQUES

Dans ce chapitre, nous traiterons d'abord de la cémentation en général, c'est-à-dire des diffusions de surface, puis nous donnerons quelques notions d'ensemble sur les soudures, et nous terminerons par les revêtements de toutes sortes, traitements ayant en vue la protection contre des corrosions diverses et même l'ornementation.

§ 1. Les cémentations.

Généralisation du terme. — Jusqu'à ces dernières années, le terme *cémentation* désignait uniquement le traitement thermochimique de l'acier par le carbone : chauffage des pièces en acier extra-doux ou doux à température élevée, au sein d'un milieu carburant, de façon à produire une pénétration superficielle du carbone dans l'acier.

Cette opération doit être normalement suivie de deux trempes convenablement réglées.

On obtient des pièces très dures en surface et dont l'âme n'est pourtant pas fragile, ce qui serait à redouter si elles étaient initialement usinées en acier dur dans toute leur masse.

Mais aujourd'hui, cette opération n'est plus qu'un cas particulier du phénomène général appelé cémentation.

A la suite de découvertes pratiques récentes auxquelles ont été appliquées avec succès les théories des diagrammes d'équilibre, on en est venu à expliquer parfaitement le processus de la pénétration et à généraliser cette notion de cémentation, que l'on peut également appeler *diffusion*.

Maintenant, l'examen initial du diagramme permet de dire *a priori* et à coup sûr si une cémentation est possible entre deux éléments.

On peut en déduire des probabilités sur les propriétés finales du produit.

L'étude théorique indique en même temps de manière très approchée les conditions opératoires optima.

C'est là un bel exemple d'évolution ayant permis d'atteindre, à partir d'applications pratiques, et grâce à une suite d'inductions scientifiques, la connaissance approfondie d'un phénomène général et l'énoncé de quelques-unes de ses lois.

Théorie générale de la cémentation

Exemples d'application

Supposons deux éléments A et B que nous mettons en contact : si aucune solution solide ne peut exister entre eux dans l'échelle des températures, aucune miscibilité n'étant possible, la diffusion ne peut être réalisée.

Mais supposons que dans une certaine zone de température et de composition, une solution solide existe : il suffira de chauffer l'ensemble des deux corps en contact à une température convenable de cette zone pour réaliser une diffusion, un échange, qui donnera des alliages dont les propriétés pourront dans certains cas être très intéressantes (dureté, inaltérabilité, couleur, etc...).

De même, si un composé défini est réalisable, celui-ci se produira.

Le terme cémentation vise donc ce traitement thermo-chimique grâce auquel on introduit par diffusion, en surface d'une pièce constituée par un certain métal ou alliage, un corps déterminé, permettant de réaliser des propriétés superficielles aptes à certains emplois alors que l'âme de la pièce reste chimiquement intacte.

Notons dès maintenant qu'il faudra parfois faire suivre ce traitement thermochimique d'un ou plusieurs traitements thermiques, afin d'obtenir les structures optima et aussi souvent pour régénérer le grain lorsqu'un chauffage prolongé à température élevée aura engendré de la surchauffe.

Cémentation de l'acier. — Prenons comme exemple le cas de la cémentation de l'acier extra-doux ou doux par le carbone; la figure 125 reproduit la partie intéressante du diagramme fer-carbone :

Considérons les aciers de cémentation aux environs de 0,1 % de

carbone : au-dessous de 700°, pas de miscibilité du fer et du carbone; entre 700° et 875°, miscibilité croissante, totale au-dessus de 875°; il faudra donc, pour réaliser au mieux une diffusion du carbone dans le fer, porter intégralement celui-ci à l'état γ qui dissout

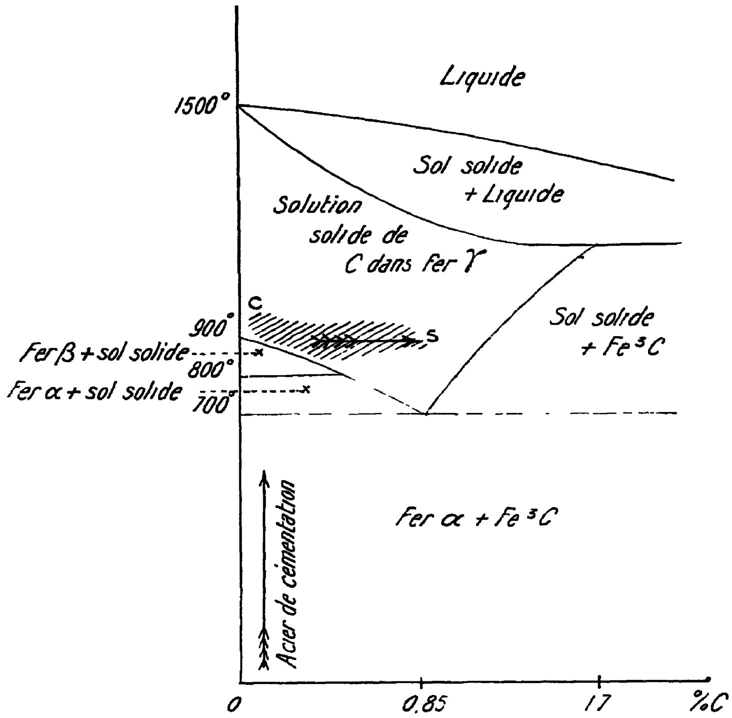


Fig. 125.

le carbone, c'est-à-dire au moins à 875°; le carbone diffusera en surface et la teneur en carbone de cette surface évoluera vers la droite du diagramme, la réaction progressant ainsi dans la région hachurée C S.

On s'arrêtera, pour des raisons qui seront indiquées à l'occasion de la « sidérurgie », lorsque la teneur superficielle correspondra à celle de l'eutectoïde et l'on aura, après refroidissement, un aspect micrographique représenté par la figure 126 : en bordure, de l'acier dur perlitique (agrégat très fin, d'aspect foncé, de ferrite et de cémentite); à cœur, l'acier de départ presque complètement cons-

titué de fer α clair. Entre ces deux extrêmes, une progression continue de composition.

On joue des variables, température de traitement et temps de

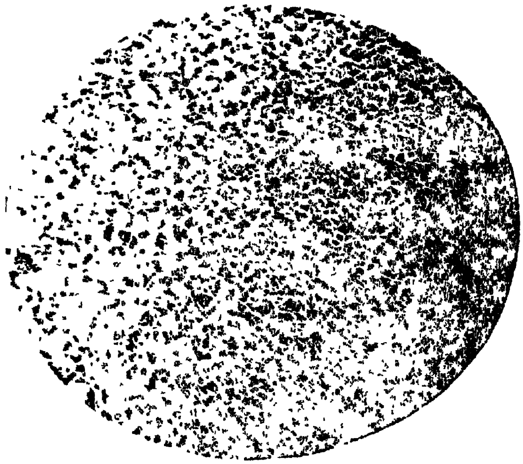


Fig. 126.

chauffe, en vue d'arriver à un traitement produisant économiquement le minimum de surchauffe.

De toute façon après l'opération deux traitements thermiques sont nécessaires, à savoir :

1° Un chauffage vers 900° avec refroidissement à l'eau pour régénérer l'acier doux surchauffé du cœur;

2° Une trempe à l'eau à 775° pour obtenir le maximum de dureté de l'acier dur extérieur.

Pour prévoir les cémentations possibles, il suffit ainsi d'examiner les diagrammes et de rechercher dans les domaines de solutions solides (les combinaisons pures n'ont en général pas d'intérêt en raison de leur fragilité), les zones optima à étudier expérimentalement.

Cémentation du fer par l'aluminium. — Prenons un autre exemple : la cémentation du fer par l'aluminium.

Le diagramme fer-aluminium, malheureusement encore imparfaitement approfondi, est approximativement donné par la figure 127. On y trouve :

1° Du côté du fer, une zone très large de solution solide;

2° Vers 50 à 60 % d'aluminium (en poids), une autre solution solide issue de la combinaison $Al^3 Fe$.

Cette dernière solution solide ne sera pas intéressante parce que certainement fragile.

Mais la première permettra, comme dans le cas de la cémenta-

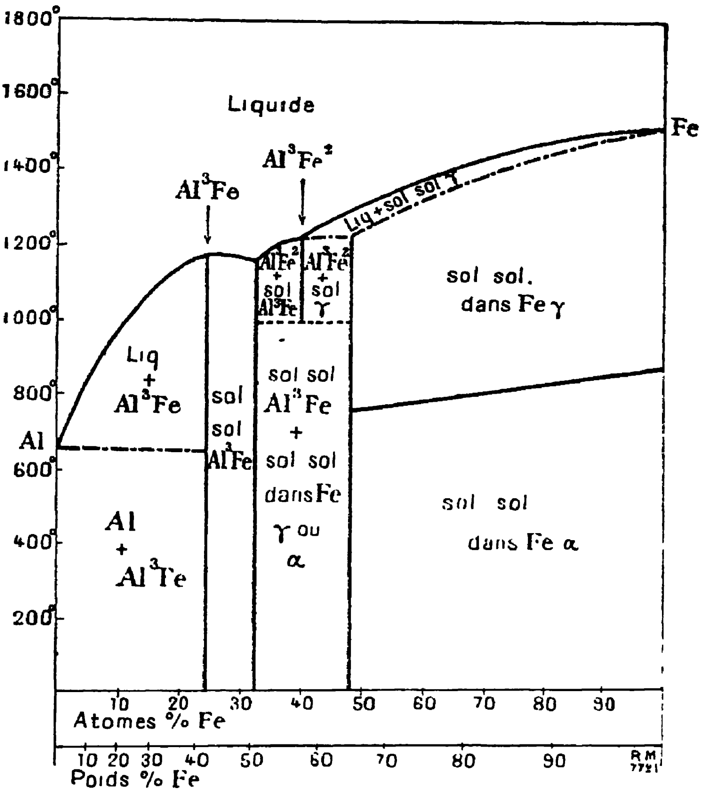


Fig. 127

Diagramme de Kurnakow, Urasow et Grigorjew. Aluminium-fer.

tion du fer par le carbone à haute température, une diffusion continue sur un domaine partant de 35 % d'aluminium environ (en poids) et allant jusqu'au fer pur.

Nous aurons, ainsi, en surface des pièces un alliage, déjà riche en aluminium, et qui sera résistant à l'oxydation à température élevée.

Si nous chauffons une pièce en fer ou en acier doux au contact d'aluminium, nous aurons donc production de deux couches :

1° Une couche extérieure, solution solide de $Al^3 Fe$, fragile;

2° Une couche intérieure qui, si l'opération dure assez longtemps, donnera une diffusion continue allant jusqu'au métal de base.

Si le contact avec l'aluminium est arrêté au bout d'un certain temps et que l'on chauffe simplement un recouvrement ainsi commencé (conditions d'emploi en service), la couche extérieure ser-

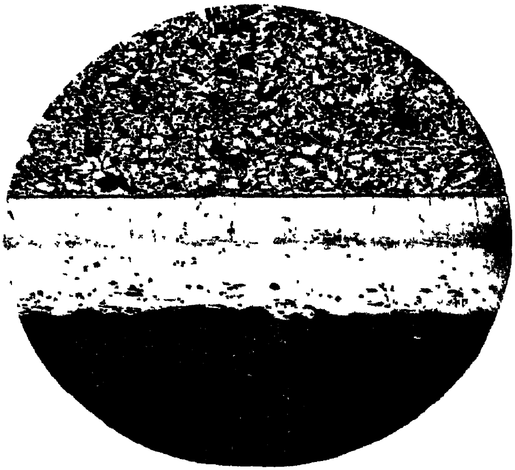


Fig. 128.

vira de nourrice à la diffusion et se résorbera dans la couche intérieure; celle-ci s'étendra peu à peu pour arriver à la cémentation continue.

La micrographie figure 128 montre une telle cémentation d'acier doux par l'aluminium.

La couche de solution solide côté fer reste seule, mais il y a encore solution de continuité entre cette couche et l'acier doux; le bord intérieur de la couche contient encore par exemple 10 % d'aluminium alors que le bord extérieur en renferme environ 35 %.

Un prolongement de chauffage augmentera la largeur de la couche et permettra d'atteindre la continuité de composition jusqu'au fer.

L'expérience montre que pour arriver à une cémentation assez rapide, il faut opérer vers 900 à 950°, dans le domaine du fer γ.

En résumé, nous dirons qu'une étude de cémentation entre deux métaux doit être précédée de l'examen approfondi du diagramme d'équilibre correspondant, en admettant que ce diagramme existe et qu'il ait été établi avec soin, ce qui n'est pas toujours le cas.

Les particularités à retenir sont les zones de solutions solides et les combinaisons définies; c'est dans ces régions-là que se produiront les pénétrations.

Les combinaisons définies ne sont pas avantageuses, car elles entraînent toujours un manque de solidité.

Elles ne paraissent heureusement se produire que lorsqu'il n'existe pas de solutions solides autour d'elles, les vitesses de diffusion dans ces dernières devant être le plus souvent très supérieures à la vitesse de formation de ces combinaisons.

Mais lorsque la combinaison donne elle-même naissance à une solution solide, celle-ci tient sa place, au détriment de la qualité de recouvrement.

Il est, par contre, très avantageux d'avoir, du côté du métal à protéger, une large zone de solution solide allant jusqu'à ce métal; la cémentation est alors continue, comme dans le cas du fer par le carbone ou l'aluminium, et l' « accrochage » du revêtement est optimum.

Les zones de température les plus favorables à l'opération sont donc à étudier d'après ces directives.

Au refroidissement, des transformations sont évidemment possibles et le diagramme les met bien en vue.

Les vitesses de diffusion entre les deux métaux en présence dépendent du couple étudié, des constituants formés, de leurs concentrations, des conditions de l'opération, des impuretés existant dans les métaux (1).

Certains composés indiqués par le diagramme peuvent, d'ailleurs, être absorbés et disparaître, par suite des grandes vitesses de diffusion dans les constituants contigus; cela ne peut être éclairci que par l'étude spéciale, expérimentale, de chaque cas envisagé.

Enfin l'intérêt d'une cémentation dépend évidemment du mode de pénétration obtenu, des teneurs et des propriétés des alliages

(1) Par exemple, un acier doux se cémente très facilement par l'aluminium, contrairement à un acier dur et surtout à une fonte; le carbone s'oppose à la diffusion de l'aluminium.

existant en surface à la température d'emploi, de la tenue, de l'accrochage et de l'imperméabilité du revêtement.

Un grand nombre de facteurs interviennent donc, parmi lesquels l'un des plus importants est la variation du coefficient de dilatation tout le long des gammes d'alliages obtenus.

Il ne faut pas oublier non plus que si la pièce est en service à des températures de diffusion des constituants réalisés, cette diffusion se poursuit dans des conditions que l'expérience doit encore ici préciser.

Enfin, nous avons signalé déjà l'obligation, dans certains cas, de traitements thermiques après cémentation.

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES CÉMENTATIONS

Vitesse et profondeur de cémentation. — L'étude expérimentale permettra seule de déterminer les vitesses de pénétration des divers constituants; elle conduira à la connaissance exacte de la diffusion des éléments entre eux.

La vitesse de cémentation est reliée à la température absolue T par une formule de la forme :

$$V = K a^{T}$$

K et a étant des constantes;

la profondeur x d'une couche cémentée est reliée au temps θ de l'opération par l'équation :

$$x^2 = n\,\theta$$

n étant encore une constante pour une température donnée.

Dans chaque cas particulier de cémentation de deux éléments entre eux, l'expérience permettra de chiffrer les coefficients.

Pratique de la cémentation. — Comment opérera-t-on pratiquement pour provoquer la diffusion ?

L'élément mis au contact de la pièce à traiter sera solide (généralement sous forme de poudre), liquide ou gazeux.

La cémentation de l'acier doux par le carbone se fait soit par

contact solide de poudre de charbon, soit par immersion dans un cyanure liquide, soit par action d'un gaz carburé, et cela à des températures voulues.

Quelquefois, on emploiera comme produit d'apport un alliage des deux éléments : un ferro-aluminium par exemple pour la cémentation du fer par l'aluminium.

Ce procédé sera souvent très avantageux. Il pourra permettre de choisir une combinaison chimique des deux éléments s'il en existe.

La fragilité de cette combinaison permettra un broyage facile, et conduira à l'obtention d'une poudre commode à employer comme cément :

Le ferro-aluminium ci-dessus indiqué répondra à la composition Al^3 Fe ou Al^3 Fe^2; il fond au dessus de 1.100°, ce qui permettra le traitement à l'état solide.

L'emploi de l'aluminium pur nécessite la cémentation liquide (température de fusion de l'aluminium : 657°).

Céments solides. — Dans tous les cas de cémentation par une poudre solide, il faudra assurer un bon contact du cément; parfois on fera le traitement au four tournant pour avoir un brassage des pièces et un renouvellement constant de contact.

Si l'on opère en boîtes fixes, il sera nécessaire de réaliser autour des surfaces à cémenter des épaisseurs de cément aussi homogènes que possible.

Il faudra également que les caisses ne soient pas trop grandes sans quoi les pièces du centre, plus longues à s'échauffer, seront moins profondément cémentées.

On pourra lutter contre cet inconvénient en traversant les caisses de tubes débouchés à leurs deux extrémités; cet artifice permet de créer des espaces auxiliaires de diffusion de chaleur à travers la masse de la boîte.

Céments liquides. — Les diffusions en présence de liquide se feront plus rapidement qu'avec un cément solide; le contact des pièces avec le bain est excellent.

Il faudra veiller à l'altération du bain car il pourra y avoir superposition du phénomène inverse : dissolution superficielle des pièces dans le liquide.

Cémentation mixte eutectique. — Un artifice peut être employé lorsqu'on trouve un eutectique dans le diagramme : prenons comme exemple la cémentation de l'aluminium par le cuivre (fig. 129); si l'on recouvre électrolytiquement de cuivre une pièce d'aluminium

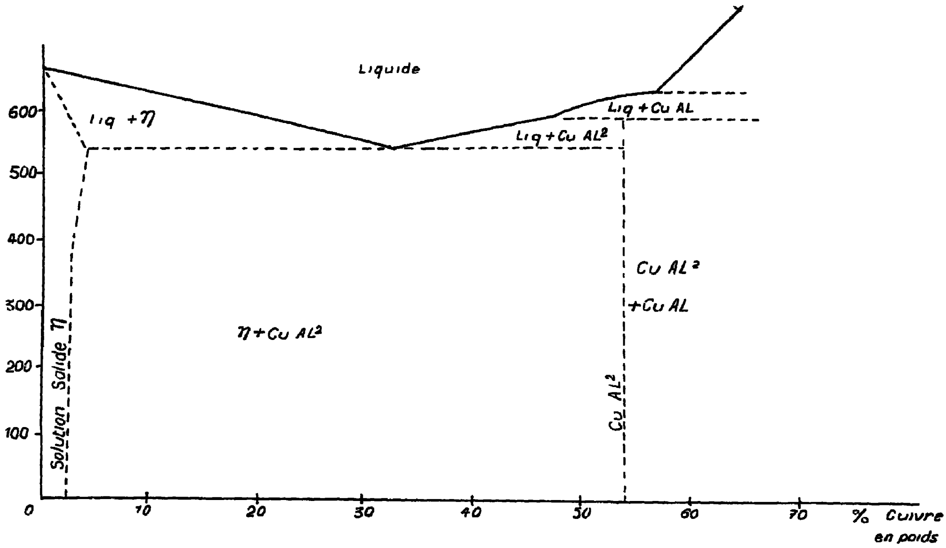


Fig. 129.

et si l'on chauffe entre la température de l'eutectique (540°) et celle de fusion de l'aluminium (657°), on a une diffusion rapide du cuivre en surface de l'aluminium, alors qu'à des températures inférieures a 540°, la vitesse de pénétration est pratiquement nulle.

Cémentations gazeuses. — Les cémentations gazeuses sont très favorables, leur action étant bien régulière (cémentation de l'acier par l'azote, dite nitruration).

D'ailleurs, très souvent, les cémentations paraissant intersolides, se font en réalité par effet gazeux : dans la cémentation de l'acier doux par le carbone pulvérulent, on a une action indéniable de l'oxyde de carbone; et même on additionne du carbonate de baryum qui, par sa décomposition, active la réaction.

On ajoute donc presque toujours dans les poudres de céments solides des produits — comme le chlorure d'ammonium — qui accélèrent la diffusion par leur action propre (formation de chlorure d'aluminium dans la cémentation du fer par une poudre à

base de ferro-aluminium), décapent le métal des pièces et chassent l'air hors des boîtes de cémentation, créant une atmosphère favorable.

Nécessité de bons contacts entre pièces et céments. — Il faut naturellement avoir soin de réaliser de bons contacts entre pièces et céments.

Il ne faut pas laisser se former, en surface des pièces, des pellicules provenant d'actions secondaires et risquant d'entraver la diffusion.

C'est ainsi que la cémentation de l'aluminium par le cuivre n'a pu être réalisée que grâce à une couche de cuivre électrolytique.

Par les autres méthodes, la grande oxydabilité de l'aluminium entraînait la formation immédiate d'un film imperméable d'alumine.

Pour le traitement par cément solide ou gazeux, l'opération sera effectuée dans des boîtes ou moufles bien hermétiques.

Il faut avoir soin de régénérer le cément qui s'affaiblit à la longue.

Réserves. — Dans certains cas, il sera nécessaire de ne cémenter que certaines régions des pièces; il faudra alors recouvrir préalablement les autres parties d'un produit protecteur empêchant le contact du cément et sa pénétration; ce sera une couche de cuivre pour les « réserves » de cémentation de l'acier par le carbone.

§ 2. Les soudures.

Définition. — Une soudure est une réunion de deux pièces, réalisée :

— soit en chauffant l'ensemble et appliquant fortement l'une contre l'autre les deux parties à réunir, ceci avec ou sans début de fusion des deux lèvres;

— soit en coulant entre les deux bords à unir, un métal ou alliage d'apport, fondu au cours de l'opération, et qui vient adhérer fortement aux lèvres; on peut dans ce traitement, et comme dans le premier cas, chauffer préalablement les deux parties à souder, et même provoquer un début de fusion pour avoir une meilleure union avec le métal ou l'alliage d'apport.

Signalons, dès maintenant, que la soudure est en liaison étroite :

— *avec les phénomènes de diffusions solide et liquide précédem-*

ment décrits : une bonne soudure doit, pour être solide, comporter des pénétrations intermétalliques des divers éléments mis en présence;

— *avec les traitements thermiques :* quand il y a surchauffe, il faut prévoir une *régénération.* De plus, sur certains alliages, les refroidissements après soudure entraînent des formations de structures devant être modifiées, avant emploi, par un traitement thermique convenable.

Pratique de la soudure. -- Avant de réaliser la soudure proprement dite, il faut toujours nettoyer très convenablement les deux bords à unir; on pourra pour cela s'inspirer des notions indiquées plus loin sur le décapage;

Les sels ou flux habituellement employés sont : les acides forts, le chlorure de zinc, le borax, la cryolithe, des fluorures alcalins, le bichlorure de lithium, des sels de phosphore, etc.

Lorsqu'on réalise un apport, on usinera souvent, dans les lèvres à unir, un chenal (pour employer le terme technique : « un chanfrein ») de forme propice à un remplissage facile et homogène et à une bonne réunion des deux bords.

Le chauffage des pièces est obtenu soit au four, soit au chalumeau oxhydrique ou oxyacétylénique dont les flammes doivent être soigneusement réglées, soit enfin par aluminothermie (1).

Les métaux ou alliages d'apport se présentent sous forme de grenaille, ou plus souvent de baguettes, de compositions très diverses suivant les cas; on distingue :

— des métaux ou alliages à bas point de fusion pour les soudures courantes : étain, alliages étain-plomb, zinc-cadmium, etc.;

— des alliages à point de fusion moyen : laitons (descendant jusqu'à 50 % de cuivre, brasures ordinaires), alliages d'argent et d'or pour l'orfèvrerie;

— des métaux à point de fusion élevé comme les aciers ordinaires ou spéciaux.

La valeur des températures de fusion ainsi que la nature des produits d'apport est souvent différente de celles des produits à souder.

Les emplois en service doivent régler ces diverses caractéris-

(1) Voir livre II.

tiques, et tout ceci doit faire l'objet d'études préalables lorsque celles-ci n'existent pas encore.

Quelquefois, les baguettes d'apport sont noyées dans un « enrobage » dont la nature chimique facilite la bonne exécution de la soudure en fluidifiant le métal ou l'alliage d'apport, l'affinant, le désoxydant, en un mot luttant contre les influences extérieures mauvaises d'altération chimique ou de refroidissement.

On peut également employer le métal ou l'alliage d'apport sous forme de tube mince, le produit d'addition étant placé dans l'intérieur.

La nature des enrobages varie ainsi très largement suivant les cas. On prend généralement les produits employés dans les affinages au cours des élaborations premières des métaux ou alliages : tels les ferro-silicium, ferro-manganèse, ferro-aluminium pour les apports d'acier.

Le chauffage pour fusion des produits d'apport, se fait à la lampe à souder, au chalumeau ou encore à l'arc électrique, ce dernier éclatant entre l'extrémité de la baguette d'apport et la pièce.

Étude technique des soudures. — Les perfectionnements en soudure sont rapides depuis quelques années.

On arrive à réaliser automatiquement des soudures électriques à l'arc, et à les produire dans des gaz déterminés afin de mieux régler l'atmosphère de production de la réaction :

Telle la soudure électrique dans l'hydrogène atomique, productrice de températures extrêmement élevées, et qui paraît être un procédé d'avenir.

Il faut souvent veiller dans l'exécution des soudures, à l'effet d'un chauffage local sur les parties adjacentes des pièces. Les alliages de faible conductibilité sont en effet susceptibles de se rompre sous ce traitement; c'est le cas des fontes que l'on doit chauffer au rouge sur un très grand espace autour de la soudure afin d'éviter les criques.

Les propriétés des soudures, surtout les propriétés mécaniques, doivent être étudiées très soigneusement.

Si l'on a fait un apport, celui-ci doit en effet posséder des propriétés aussi voisines que possible du reste de la pièce et compatibles avec les exigences d'emploi.

Au laboratoire la micrographie jouera un rôle essentiel, car elle

permettra d'étudier la diffusion de la soudure en profondeur, son enracinement, en liaison étroite avec sa solidité.

D'autre part, la soudure devra être bien « pleine » dans toute sa masse, ne pas comporter de porosités, de soufflures, de ségrégations ou retassures, ne pas présenter de défauts d'adhérence entre les parties qui étaient à unir, ou entre celles-ci et les produits d'apport.

Les vérifications de laboratoire, telles que la métallographie microscopique, les essais magnétiques pour les métaux ferro-magnétiques sont d'un réel intérêt.

Aptitude des métaux ou alliages à la soudure. — D'une façon générale, qu'il s'agisse de métaux ou d'alliages, les *puretés* maxima sont requises.

C'est ainsi que les produits sidérurgiques doivent contenir aussi peu de soufre et de phosphore que possible, l'aluminium le minimum de fer et de silicium, le cuivre, le minimum d'oydules de cuivre, etc...

Ceci dit, les aciers ordinaires au carbone sont d'autant mieux soudables qu'ils sont moins carburés (on recherche une teneur moyenne de 0,2 de carbone).

Parmi les aciers spéciaux, citons un acier *chrome-molybdène* employé en Amérique dont la composition approximative est la suivante : C de 0,25 à 0,35; Cr de 0,8 à 1,10; Mo de 0,15 à 0, 25. Le métal d'apport est un fil d'acier doux ou un fil chrome-molybdène de même composition.

Les fontes très siliceuses, à l'état de fonte grise peuvent être soudées.

Le cuivre pur est facilement soudable, ainsi que le plomb, le zinc, etc... Pour les métaux ou alliages très oxydables comme l'aluminium, l'emploi de sels désoxydants, au cours de la soudure, donne de bons résultats (Voir aluminium).

Parmi les métaux ou alliages les plus rebelles à la soudure il faut citer les aciers ordinaires carburés à partir du demi-dur jusqu'à l'extra-dur, les fontes blanches, les aciers au silicium, le nickel, etc...

Contrôle. — L'analyse chimique du métal ou de l'alliage révélera la composition et le degré de pureté du produit. C'est là un point capital à examiner.

L'aptitude du métal ou de l'alliage à la soudure pourra être mise en évidence au moyen d'éprouvettes de traction par du personnel spécialisé, d'ailleurs le même que celui d'ateliers pratiquant les soudures avec ledit métal ou alliage.

Il faut bien noter, en effet, que la soudure est une opération d'exécution *essentiellement individuelle*, dans laquelle le coefficient personnel est énorme. S'assurer de la valeur de ce coefficient est indispensable. On conçoit donc la nécessité d'un apprentissage soigné et d'un entraînement intense du personnel soudeur, dans des centres spéciaux de perfectionnement, réalisant ainsi un contrôle des soudeurs.

La solution complète du problème sera obtenue par la généralisation d'un procédé pratique de contrôle d'atelier s'appliquant aux pièces fabriquées en grande série.

§ 3. Revêtements superficiels divers des métaux et alliages.

Il existe un très grand nombre de modes de revêtements des métaux ou alliages; les uns ont pour but une amélioration de la tenue à la corrosion ordinaire ou à des attaques particulières; d'autres visent un aspect agréable des pièces finies.

Nous examinerons ces différents modes d'après le processus suivant :

A. — Préparation des surfaces;
B. — Cémentation (diffusion superficielle à chaud d'un élément convenable);
C. — Coulée double ou triple:
D. — Placage à chaud;
E. — Immersion dans un bain de métal ou d'alliage fondu;
F. — Application d'un métal de recouvrement par pulvérisation;
G. — Application de produits organiques : peintures, vernis, laques, émaux, etc.;
H. — Déplacement métallique chimique sans courant électrique extérieur;
I. — Procédés purement chimiques autres que le précédent;
J. — Dépôts métalliques électrolytiques;
K. — Oxydations anodiques.

A) *Préparation des surfaces.*

Presque toutes ces méthodes exigent, avant application, un parfait nettoyage et quelquefois une préparation des surfaces à recouvrir.

Ce résultat est obtenu par *décapage* et *polissage*.

Décapage. — On peut distinguer trois sortes de décapages :
1° Le décapage mécanique par sablage ou grenaillage;
2° Le décapage chimique sans effet électrique;
3° Le décapage électrolytique.

1° *Décapage mécanique.* — On opère parfois à la main avec des curettes en acier trempé ou avec des brosses de fil d'acier; mais la méthode la plus importante est le sablage et le grenaillage : au moyen d'air comprimé sous une pression de 1 à 4 kg, on dirige sur la pièce un violent jet de sable ou de grenaille de fonte; l'action mécanique ainsi obtenue est puissante. On la règle par la pression d'air comprimé, le diamètre de la buse, la nature du sable ou de la grenaille et la grosseur et la forme de leurs grains, la distance entre la buse et la pièce.

Pour les gros décapages, on utilise des grains anguleux, pour les décapages fins, qui sont presque des polissages, des grains ronds; d'autre part, les grains doivent être d'autant plus gros et la pression d'air plus forte que les métaux ou alliages à décaper sont plus durs.

Le sable doit être aussi siliceux que possible; on emploie du sable de Fontainebleau ou du granit pulvérisé. La grenaille est soit en acier spécial, soit mieux en fonte spéciale.

Les appareils employés sont les mêmes; on opère en espace clos, surtout pour le sablage, les grains de sable en suspension dans l'air pouvant causer des dommages à tout l'entourage. C'est même là un sérieux avantage du grenaillage au point de vue hygiène du personnel et conservation de la matière abrasive; les ouvriers doivent porter, pour le sablage, des casques très hermétiques sous risque de s'exposer à de graves lésions; de plus, avec le grenaillage, le travail se fait mieux et plus vite parce que l'ouvrier, n'étant pas gêné par les nuages de sable, voit ce qu'il fait et parce que la gre-

naille a un pouvoir abrasif supérieur; enfin, le sable s'use vite et donne une poudre fine qui ne décape plus; la grenaille a une existence parfois cent fois plus longue.

Une surface métallique sablée ou grenaillée offre au microscope l'aspect d'une suite de cratères; l'ensemble est naturellement d'autant plus uniforme que le travail a été fait plus finement.

L'opération est assez coûteuse; mais il faut signaler que certains produits exigent absolument un sablage ou grenaillage avant certains revêtements : tels l'aluminium et les alliages légers avant dépôt électrolytique; on ne peut obtenir sans décapage mécanique une adhérence satisfaisante en raison de l'impossibilité d'enlever convenablement la pellicule superficielle d'alumine par seule action chimique. Il faut veiller à ce que des grains trop fins sous une pression trop forte ne viennent s'incruster et ne restent dans la surface des pièces; c'est ce qui se passe couramment avec les métaux ou alliages très mous comme le magnésium et les alliages ultra-légers.

Pour les alliages ferreux et surtout la fonte, s'il reste du sable en surface des pièces, on peut le faire disparaître par un traitement à l'acide fluorhydrique, lequel permet aussi l'enlèvement des restes de sable de moules de fonderie.

2° *Décapage chimique sans effet électrique.* — Le procédé revient à une simple immersion ou à un brossage des pièces dans des bains chimiques convenablement choisis. On distingue deux subdivisions : le dégraissage et la désoxydation des surfaces à décaper.

a) *Dégraissage.* — On peut brûler les matières organiques au four, vers 300°.

On peut également les dissoudre dans des hydrocarbures, de l'essence, du benzol, etc.; le carburant national donne des résultats excellents.

Mais les bains les plus employés sont les alcalis, soude ou potasse, étendus, avec ou sans addition de sels alcalins comme les cyanures ou les carbonates; on opère le plus souvent à chaud, et même à l'ébullition; l'opération est suivie d'un rinçage à l'eau.

Le matériel consiste en cuves chauffées, les petites pièces étant placées dans des paniers métalliques ou en grès, ajourés pour une bonne circulation du décapant; on agite les pièces dans le bain, à la main ou mécaniquement. On peut aussi utiliser des tonneaux comme ceux décrits plus loin pour la désoxydation.

On perfectionne parfois par un brossage à la ponce ou au lait de chaux, effectué sur des tables inclinées, suivi d'un nouveau lavage.

b) *Désoxydation.* — Ici, la nature du bain dépend essentiellement des produits à décaper. Il s'agit d'enlever l'altération superficielle en attaquant le moins possible le métal ou alliage de base; malheureusement, celui-ci est presque toujours plus vulnérable.

On distingue trois genres d'action, simultanés ou non, de ces bains sur les couches oxydées, à savoir :

une plus ou moins grande dissolution chimique de l'altération superficielle elle-même;

une séparation de cette couche, du métal ou alliage de base, ceci le plus souvent par début d'attaque de ce dernier, avec une intensité dépendant de la porosité de l'altération superficielle;

enfin une action purement mécanique, les bulles gazeuses provenant de la réaction : décapant + métal ou alliage de base, activant le décollage et la chute de la couche superficielle.

Les produits les plus employés sont les solutions d'acides forts, employés le plus souvent à chaud (50° à 75°); la température a une grosse influence sur l'altération du métal ou alliage de la pièce.

Pour les alliages ferreux (1), on utilise les solutions d'acide sulfurique, plus rarement d'acide chlorhydrique, ces dernières attaquant à chaud toutes les cuves en matériaux courants; on additionne parfois un peu de chlorure de sodium. On peut également employer les bisulfates alcalins à la place des acides eux-mêmes. On a utilisé aussi avec succès l'acide phosphorique.

Pour le cuivre et ses alliages, les formules acides sont nombreuses : solutions sulfuriques, avec ou sans addition de bichromates ou de nitrates alcalins, pour le « dérochage » lent; solutions azotiques concentrées, avec ou sans addition de chlorure de sodium pour une action rapide, de quelques secondes; mélanges d'acides sulfurique et nitrique en solution, avec ou sans addition de faibles quantités de chlorure de sodium ou d'acide chlorhydrique, pour obtenir un blanchiment et un meilleur brillant des pièces.

Pour les métaux et alliages légers, à base d'aluminium, après le

---

(1) L'opération est souvent appelée décalaminage, le terme calamine désignant ici l'oxyde de fer, contrairement à son sens scientifique exact : minerai carbonaté de zinc.

sablage obligatoire, on peut employer une immersion de quelques secondes dans une solution de chlorure de sodium et bicarbonate de soude, ou mieux dans l'acide azotique concentré; après lavage à l'eau, il faut immédiatement, sans séchage, passer au traitement de recouvrement sans quoi la surface des pièces se recouvre bien vite d'un film d'alumine.

Dans la plupart de ces bains acides, il est avantageux d'employer des additions qui, par un processus théorique encore mal connu, empêchent ou tout au moins ralentissent l'attaque du métal ou alliage de base. Pour les alliages ferreux, on utilise à cet effet des substances organiques issues de la distillation de la houille ou des mélanges à base de formol; comme corollaire de la moindre attaque des pièces elles-mêmes, on a une économie d'acide et un entraînement beaucoup moindre de particules acides dans les vapeurs, d'où amélioration de l'hygiène dans les ateliers.

Enfin, pour amplifier l'action mécanique de décollement des oxydes, on met parfois en suspension dans le bain des produits solides fins et durs, comme l'alumine, la silice, la suie, etc.

Le matériel est analogue à celui de dégraissage, sauf qu'il faut bien veiller ici à leur attaque par les solutions acides; on emploie généralement des cuves de bois, chemisées de plomb pour les solutions sulfuriques.

Les petites pièces sont agitées dans des paniers en métal ou en grès.

Le chauffage est réalisé par la vapeur, le gaz ou l'électricité.

On utilise aussi très souvent des tonneaux tronconiques tournant autour de leur axe incliné à 60° environ sur le plan horizontal: la petite base dirigée vers le haut et ouverte, sert aux chargement et déchargement; la sortie des pièces est facilitée par un système de basculement du tonneau. On emploie dans ces tonneaux des solutions acides froides avec souvent un assez fort pourcentage de sable produisant un décapage par simple frottement.

Il faut veiller à ne pas trop prolonger ces décapages acides, de peur, d'abord d'attaquer le métal ou alliage de base, ensuite de provoquer une occlusion d'hydrogène en surface des pièces; cette occlusion entraîne une fragilité superficielle et gêne certains dépôts; on peut faire partir cet hydrogène par un chauffage, mais ce traitement, bien que léger, risque d'altérer à nouveau les surfaces.

Enfin, il est souvent utile, non seulement de laver les pièces à

l'eau, mais auparavant de les passer dans une solution qui neutralise l'acide entraîné, solutions alcalines faibles, etc., surtout si les formes des pièces sont compliquées et s'il existe des rainures ou recoins profonds.

3° *Décapage électrolytique.* — C'est là une méthode encore peu employée, mais de grand avenir.

Décapage basique. — Elle doit surtout être conseillée pour le *dégraissage :* les pièces sont placées en cathodes dans un bain sodique ou potassique renfermant des additions variables de cyanures et carbonates, quelquefois phosphates ou chlorures alcalins; les anodes sont en fer ou en charbon; tension 6 à 12 volts; densité de courant importante : 6 à 10 ampères par décimètre carré; température normale ou chaude suivant les cas; une immersion d'une à deux minutes suffit en général; l'essentiel est de provoquer sur les pièces en cathodes un *très violent bouillonnement* qui agit par lui-même mécaniquement, le bain alcalin opérant en même temps par voie chimique.

Souvent, on ajoute à l'électrolyte une faible proportion d'un sel métallique de cuivre ou cadmium, le métal déposant un film excessivement mince, de l'ordre du 1/1000 mm à mesure que les surfaces deviennent propres; c'est, si l'on veut, un indicateur de dégraissage; l'opération porte alors le nom de dégraissage-cuivrage (surtout employé sur alliages ferreux et alliages légers pour bien voir le changement de coloration) et dégraissage-cadmiage (surtout utilisé sur alliages cuivreux).

Il faut bien avoir soin de ne pas forcer la teneur du bain en métal, sans quoi l'on risquerait de déposer celui-ci avant dégraissage parfait, d'où manque d'adhérence du dépôt.

Dans le même ordre d'idées, il faut toujours employer des anodes neutres.

Lorsque les pièces renferment des métaux comme le zinc, l'étain ou le plomb, on a parfois, à la fin du dégraissage, dissolution superficielle de ces éléments dans le bain; aussi les redépose-t-on en partie en renversant pendant une quinzaine de secondes le sens du courant, à la fin de l'opération.

Décapage acide. — Le décapage électrolytique acide (électrolyte : solution sulfurique à 10 % environ avec ou sans sulfate de soude;

pièces en anodes, avec une cathode généralement en zinc) a beaucoup moins d'intérêt car il grave toujours profondément le métal ou alliage de base; de plus des traces résiduelles d'acide s'incrustent dans les porosités; l'occlusion déjà signalée d'hydrogène devient redoutable; enfin le prix de revient est élevé par suite des très fortes densités de courant, variant entre 10 et 30 ampères par décimètre carré et de l'altération rapide du bain qu'il faut fréquemment renouveler.

La méthode est seulement à conseiller pour les produits très profondément oxydés ou pour les pièces creuses, bouteilles ou récipients en acier, à l'intérieur desquelles un décapage ordinaire n'a que peu d'effet.

On doit aussi avoir recours à lui lorsque le revêtement ultérieur exige une gravure initiale assez profonde du métal en vue d'un « accrochage » suffisant de la protection : c'est le cas pour le « nickelage à épaisseur » dont nous parlerons plus loin; mais pour les désoxydations ordinaires, le bain sans électrolyse est à préférer.

Polissage. — Certains modes de revêtements, comme les dépôts électrolytiques, permettent d'obtenir des surfaces finales très brillantes, exigent un polissage initial.

On utilise à cet effet des meules et quelquefois des machines automatiques de polissage, les abrasifs étant de nature extrêmement diverse : carborundum, corindon, émeri, potée d'émeri, tripoli, argile, ponce, chaux, alumine, oxyde de fer (rouge d'Angleterre), oxyde de chrome, blanc d'Espagne (carbonate de chaux), etc.

Ces produits, ou bien servent à faire des meules complètes (carborundum, corindon), ou bien sont agglomérés (autres produits) à l'aide d'un liant, sur des meules en bois, cuir ou étoffe; les cuirs (de buffle ou autres) et les étoffes (feutre, calicot, coton, laine) sont soit fixés sur le pourtour d'une meule en bois, soit découpés en disques que l'on accole et coud les uns aux autres pour réaliser une meule complète d'une certaine épaisseur.

Parfois, enfin, on pulvérise les abrasifs mis en suspension dans un liquide, sur la tranche ou le flanc des meules.

On emploie aussi des brosses ou pinceaux en fils d'acier ou de laiton très écroui (grattebossage); le frottement est facilité par la présence d'une solution plus ou moins grasse.

Enfin, pour les finitions très poussées, les meules douces ci-dessus indiquées peuvent être utilisées directement sans abrasifs, et l'on termine avec des brosses de flanelle ou de peau de chamois.

On emploie toujours une cascade de polissages successifs de plus en plus fins, en croisant autant que possible les raies, comme cela a été indiqué pour le polissage micrographique.

Il faut avoir soin de prévoir une aspiration des poussières dans les ateliers de polissage, le traitement mettant toujours en suspension dans l'atmosphère des poussières provenant des pièces et de l'abrasif, d'où danger très grand pour les voies respiratoires.

Les polissages de petites pièces sont aussi réalisés mécaniquement dans des tonneaux tournants, à axe horizontal et de section polygonale; l'abrasif est généralement du sable en suspension dans une certaine quantité d'eau.

Finissage des surfaces après dépôt. — On peut aussi faire rentrer ici le polissage de revêtements : nickelage, argenture, etc.

Pour les petites pièces en grande série, la méthode du tonneau est employée, le sable étant remplacé par du son, de la sciure de bois, ou simplement des chiffons, et l'opération s'effectuant à sec.

Pour les pièces plus grosses ou pour celles exigeant un beau fini, on commence généralement par un grattebossage, puis on opère sur meules de buffle ou drap à sec avec des produits fins comme le rouge d'Angleterre, le vert de chrome, la chaux ou l'alumine; on termine même parfois par un « brunissage », opération consistant à lisser la surface du dépôt par action d'un outil en acier ou en agate; on opère à la main ou mécaniquement, le glissement étant facilité par la présence d'eau de savon ou d'un produit analogue; ce traitement a l'avantage de boucher les porosités du dépôt et de durcir la surface par écrouissage; d'où une amélioration de la résistance à l'usure.

B) *Cémentation.*

Nous avons donné plus haut la théorie de ce phénomène et cité quelques exemples. Le procédé peut être employé pour améliorer la résistance à la corrosion; tel est le cas déjà décrit de la cémentation des alliages ferreux par l'aluminium, donnant une bonne tenue à température élevée, en atmosphère oxydante.

Citons, dans le même ordre d'idées :

— la cémentation des alliages ferreux par le ferro-silicium donnant en surface un alliage à 15 à 20 % de silicium, très résistant aux attaques acides, notamment azotique;

— la cémentation des alliages ferreux par le zinc, ou shérardisation, donnant une certaine amélioration de résistance à la corrosion ordinaire;

— la cémentation du cuivre par le nickel, l'étain, le zinc et l'aluminium — et de l'aluminium par le cuivre, donnant une bien meilleure tenue à la corrosion, une plus grande dureté, un aspect parfois meilleur.

C) *Coulée double ou triple.*

Cette méthode a été décrite dans le chapitre de la fonderie (p. 179).

D) *Placage à chaud.*

Le procédé consiste à juxtaposer deux ou trois éléments, par exemple une tôle de laiton et une feuille d'argent, ou une tôle de laiton entre deux feuilles d'argent, et, après réchauffage dans un four à moufle, de laminer le tout.

Si les surfaces de contact ont été bien préparées, il y a adhérence par suite de la pression exercée à température élevée; on n'interpose aucune soudure; il faut généralement effectuer plusieurs laminages successifs avec des réchauffages intermédiaires.

On réalise également de cette façon des fils plaqués, ou doublés, en partant d'un fil en un certain métal ou alliage, placé dans un tube en un autre métal ou alliage.

C'est sourtout pour l'orfèvrerie que ce procédé est utilisé.

E) *Immersion dans un bain de métal ou d'alliage fondu.*

La méthode consiste dans l'immersion, pendant un temps relativement court, des produits semi-fins ou des pièces dans un bain de métal ou d'alliage fondu.

Le phénomène déjà exposé de la cémentation intervient donc ici.

Il y a une diffusion en profondeur, lorsque le diagramme le per-

met, mais la pénétration est toujours faible en raison même de la courte durée de l'opération, ceci pour éviter l'altération du bain qui sans cela serait rapide comme nous l'avons déjà indiqué.

Les exemples de ce traitement sont assez nombreux et importants, citons :

La galvanisation, recouvrement par le zinc;

L'étamage, recouvrement par l'étain (fer-blanc);

Le plombage, recouvrement par le plomb;

Le cuivrage, etc...

Nous indiquerons ci-après quelques notions d'ensemble sur ces opérations qui peuvent ne pas s'appliquer seulement aux alliages ferreux.

Tout d'abord, d'une manière générale, ces traitements ne doivent pas être considérés comme des traitements de haute qualité : la présence d'un bain fondu, son altération, lente, mais effective, par les pièces à recouvrir, la présence obligatoire d'une *couverte* empêchant dans la mesure du possible l'oxydation superficielle du bain par l'air, la traversée de cette couverte par les pièces qui entraînent en plus avec elles des produits de décapage, la rapidité de l'opération s'effectuant presque toujours sans arrêts par un déplacement continu des pièces, toutes ces causes séparées ou réunies constituent un obstacle à l'obtention de résultats parfaits.

Il est bien connu que les pièces galvanisées ou étamées présentent très fréquemment des défauts locaux.

Il faut donc considérer ces traitements comme des opérations pour travaux continus de série.

Ils ne conduisent pas à une qualité courante analogue à celle d'un dépôt électrolytique.

En revanche, ils sont moins onéreux et compensent parfois ces défauts d'exécution par une plus grande épaisseur de la couche déposée, et permettent souvent d'atteindre des valeurs de protection extrêmement intéressantes contre la corrosion.

Galvanisation. — Le zinc se classant très bas dans la série des potentiels électrolytiques (voir tableau ci-joint), son action de protection galvanique sur les métaux usuels est un facteur très important.

Les bains de zinc sont le plus souvent maintenus entre 450° et 500°.

Tableau des potentiels électrolytiques normaux des principaux métaux.

Or	+ 0,99
Platine	+ 0,86
Argent	+ 0,80
Mercure	+ 0,79
Antimoine	+ 0,47
Cuivre	+ 0,34
Hydrogène	0
Plomb	— 0,14
Étain	— 0,15
Nickel	— 0,22
Cobalt	— 0,23
Fer	— 0,34
Cadmium	— 0,42
Chrome	— 0,47
Zinc	— 0,77
Manganèse	— 1,08
Aluminium	— 1,34
Magnésium	— 1,70
Calcium	— 2,61
Sodium	— 2,72
Potassium	— 2,93

L'oxydation du bain est combattue par l'emploi d'un fondant de surface.

Ce fondant est le plus souvent du chlorure d'ammonium donnant avec l'oxyde de zinc, de l'ammoniaque et du chlorure de zinc.

Ce dernier forme en surface, si la température est suffisante, une mousse épaisse qui décape une dernière fois les pièces au moment de leur introduction dans le bain et facilite l'adhérence du zinc.

On constate ainsi l'avantage d'une température élevée. Cette élévation de température permet en plus d'obtenir une plus grande fluidité du zinc. Elle entraîne par contre une détérioration rapide des cuves.

Pour résoudre cette difficulté, on ajoute au bain un faible pourcentage d'aluminium : 0,05 à 0,15 %, qui le fluidifie; d'autre part, cette addition réduit l'oxydabilité du bain, ce qui, dans un sens, est un avantage, mais provoque d'un autre côté, la non-formation de mousse de chlorure de zinc en quantité suffisante pour l'effet

bienfaisant déjà signalé; il n'y a plus assez d'oxyde de zinc pour réagir sur le chlorure d'ammonium; on tourne cette nouvelle difficulté en plongeant les pièces, après décapage, dans une solution concentrée de chlorure de zinc.

Les pièces, après refroidissement, ont presque toujours un aspect cristallin, à facettes brillantes (fleurs de zinc), dont le développement et la beauté dépendent de plusieurs facteurs dont le plus important est la vitesse de refroidissement du dépôt.

Les cuves sont en acier coulé ou en tôle d'acier emboutie ou soudée de qualité extra-douce, assez pure (élaborée au four Martin); l'épaisseur moyenne est habituellement voisine de 30 mm.

Le chauffage doit être disposé en vue d'éviter les coups de feu et surchauffes locales provoquant une attaque rapide de la cuve par le zinc; à cet effet on ajoute souvent, dans la cuve une assez forte quantité de plomb qui n'est pas miscible avec le zinc, coule dans le fond de la cuve par différence de densité et y forme un matelas régulateur de température et ne provoquant pas l'inconvénient ci-dessus indiqué.

Les galvanisations comme celles des fils, des grillages, se font d'une façon continue, ces produits se déroulant sans arrêt pour passer au bain et se bobiner à nouveau à la sortie.

On emploie pour apprécier l'épaisseur de zinc sur alliages ferreux, le procédé suivant, très répandu bien que fort critiquable : on plonge la pièce dans une solution de sulfate de cuivre; il y a dissolution de zinc et lorsque le fer apparait, le cuivre se dépose sur lui.

La solution renferme habituellement 200 gr de sulfate de cuivre cristallisé par litre d'eau; on sature l'acide libre, s'il y en a, par l'oxyde noir de cuivre; température d'essai : 15°.

La pièce bien décapée est rincée, puis séchée, puis immergée pendant une minute; on lave, essuie, examine; si le cuivre ne reste pas après l'essuyage, on recommence.

On caractérise dans les cahiers des charges l'épaisseur de zinc par le nombre d'immersions ainsi exécutées, la dernière (comportant le dépôt de cuivre) ne comptant pas: une pièce de bonne qualité courante doit résister à quatre immersions.

ÉTAMAGE. — *Préparation des pièces.* — Tout d'abord, les pièces sont décapées et avant immersion dans l'étain sont passées

soit dans du chlorure de zinc, soit dans un produit permettant d'obtenir un séchage parfait.

Immersion dans le bain. — Le principe est à peu près le même que celui de la galvanisation, sauf que l'on réalise au moins deux immersions successives dans l'étain : d'abord dans un bain très chaud (275° environ) sur lequel il y a formation de crasses par suite des impuretés entraînées par les pièces; ensuite dans un bain moins chaud, (aux alentours de 250°) bain qui reste pur.

Ce double passage, à température décroissante, favorise également la formation correcte du dépôt.

Quelquefois on réalise trois ou même quatre immersions successives.

Le bain initial est périodiquement affiné par perchage au bois vert; les crasses remontent et sont écumées.

Chaque cuve comporte presque toujours une cloison verticale séparant en deux la surface du bain d'étain et n'arrivant pas jusqu'au fond de la cuve; les deux parties de la cuve forment ainsi vase communicant.

Les produits sont introduits d'un côté et sortent par l'autre, après être passés sous la cloison.

On ne prend des cuves ordinaires sans cloison que lorsque le genre de pièces rend impossible un tel trajet.

On utilise le plus fréquemment du chlorure de zinc comme « couverte » de la surface d'entrée du premier bain, et un produit gras, suif ou colophane ou mieux huile de palme, sur la surface de sortie et sur toutes les surfaces, sans distinction, de l'autre ou des autres bains.

Enfin, on a toujours soin de brosser ou de secouer les pièces à la sortie de chaque bain, afin de ne laisser sur elles qu'une couche très mince d'étain, métal cher.

Fer-blanc. — Dans la très importante fabrication du fer-blanc, on part de tôles fines en acier d'excellente qualité; ces tôles ont été très soigneusement laminées et dressées à froid.

Elles sont entraînées à travers les différentes cuves grâce à des mécanismes automatiques.

L'enlèvement de l'étain en excès après chaque bain est réalisé par des laminoirs multiples (il y en a deux ou trois à chaque sortie

de cuve) qui, en plus, lissent bien uniformément la surface et donnent une excellente opacité de revêtement.

On opère d'une manière analogue pour les fils étamés, l'enlèvement de l'excès d'étain étant effectué par des tampons.

Pour les pièces de qualité inférieure, on utilise un alliage d'étain et de plomb afin d'abaisser le prix de revient.

Plombage. — Ce procédé est évidemment très bon marché, mais il a de nombreux défauts :

— on n'a pas cémentation, le plomb n'étant pour ainsi dire pas miscible avec les alliages ferreux, cuivreux et légers; donc accrochage défectueux;

— le plomb laisse au-dessous de lui le fer et l'aluminium dans la série des potentiels électrolytiques.

S'il y a la moindre porosité du revêtement, il provoquera une activation galvanique de l'attaque de ces métaux de base et de la plupart de leurs alliages, et, en raison de la non-diffusion en profondeur, la couche de plomb sera rapidement soulevée;

— la densité élevée du plomb oblige à exercer un effort sur les pièces pour provoquer et maintenir l'immersion;

— contrairement aux recouvrements de zinc et d'étain, il est très difficile d'enlever par voie chimique les revêtements de plomb.

Le procédé est donc très peu employé; on utilise pour sa mise en œuvre un appareillage très semblable à celui de l'étamage; le bain est maintenu vers 350°.

La méthode a été préconisée il y a quelques années aux lieu et place du cuivrage ou du savon pour l'étirage; le plomb semblerait en effet constituer pour un tel traitement une bonne lubrification.

Cuivrage. — La température élevée de fusion du cuivre ayant comme corollaire la difficulté d'introduire dans un bain aussi chaud, des alliages ferreux non oxydés, a fait abandonner la méthode du cuivrage en bain liquide.

Nous signalerons, cependant, le procédé du bi-métal qui consiste à immerger une ébauche d'acier dans du cuivre fondu, puis à emprisonner un volume annulaire de cuivre entre cette ébauche et un tube d'acier descendant autour de l'ébauche. On retire le tout et après solidification du cuivre, on lamine l'ébauche ainsi recouverte.

On peut d'ailleurs, au lieu de cuivre, employer comme revêtement d'autres métaux et alliages.

F) *Application d'un métal de recouvrement par pulvérisation.*

Il s'agit ici du *procédé Schoop*. Le principe consiste en une projection, sur la surface à protéger, d'un violent jet d'air comprimé tenant en suspension de fines particules liquides du métal à déposer; ces petites particules viennent s'écraser et se solidifier sur la surface où elles forment un revêtement.

L'appareil utilisé est une sorte de pistolet dont le canon laisse passage à l'air comprimé; dans l'axe du canon, un fil du métal à déposer est fondu par une flamme de chalumeau ou électriquement; le fil avance automatiquement d'une manière continue, au fur et à mesure de sa fusion.

Le défaut inhérent à ce procédé réside dans l'oxydation superficielle des particules.

Lorsqu'elles arrivent sur la pièce, elles sont recouvertes d'une pellicule d'oxyde qui se déchire lors de l'écrasement mais reste dans le revêtement,lequel continue d'ailleurs à s'oxyder, à mesure qu'il se forme, sous le jet d'air comprimé. Ce défaut entraîne d'abord un manque d'adhérence et ensuite une indiscutable porosité.

On a essayé d'y remédier en chauffant le dépôt pour réaliser une cémentation, mais la pénétration ne se fait que d'une manière extrêmement irrégulière par suite des barrages opposés par les oxydes.

On a tenté également de perfectionner les pistolets de projection et de produire un jet de gaz ou de mélange de gaz réducteurs; mais le réglage est difficile, et le prix de revient très élevé.

Le métal le plus couramment projeté est le zinc.

La protection est, pour les raisons indiquées, moins efficace que celle de la galvanisation ou du zincage électrolytique.

Son emploi est cependant très indiqué pour le recouvrement de constructions métalliques à surfaces pleines, déjà montées et en place : coques de navires, portes d'écluses, gazomètres, et en général grosses tôleries.

Pour les pièces immergées, on a une protection galvanique comme nous l'avons déjà indiqué plus haut, et la porosité a moins d'incon-

vénients; pour des charpentes ajourées, pylônes et autres, on a des pertes abondantes de métal et le prix de revient s'en ressent.

On a également essayé la pulvérisation d'aluminium pour rendre les pièces inoxydables à température élevée; mais on a production abondante d'alumine et la porosité agit d'une manière défavorable.

On a par contre obtenu récemment des résultats très intéressants par projection de cadmium.

G) *Application de produits tels que peintures, vernis, laques, émaux.*

Nous ne nous étendrons pas sur ce chapitre qui nécessiterait d'abondants développements et nous entraînerait loin de notre sujet principal. Rappelons seulement les principes essentiels.

Les *peintures* sont constituées par des pigments colorés en suspension dans un liquide convenable comme l'essence de thérébenthine, l'huile de lin, etc... additionné s'il y a lieu d'un siccatif (provoquant la solidification par absorption rapide de l'oxygène de l'air).

On donne presque toujours une première couche d'impression, généralement au minium (oxyde métallique) : autrefois minium de plomb, maintenant minium de fer ou d'aluminium; ces deux derniers ont un pouvoir couvrant plus considérable, sont moins chers et non toxiques; après cela, pour les beaux recouvrements, on passe une ou plusieurs couches d'apprêt, on fait un ponçage et on finit par une laque ou un vernis.

Les *laques* manquent parfois d'opacité et leur application doit alors être précédée de celle d'une couche de peinture de même couleur.

Les *vernis*, constitués : 1° de résines, oléo-résines ou baumes; 2° d'un dissolvant, donnent après séchage une surface brillante très agréable à l'œil.

On distingue, d'après la nature du dissolvant, les variétés suivantes :

Les vernis gras (huile de lin et essence de thérébenthine);

Les vernis à l'essence (essence de térébenthine ou essence de pétrole : *white spirit* ou benzoline);

Les vernis à l'alcool, les vernis spéciaux (cellulosiques ou nitrocellulosiques, dissolutions de celluloïd ou d'un mélange de camphre

et nitrocellulose dans l'acétate d'amyle; vernis à base de caoutchouc, vernis renfermant des bitumes, brais, etc.).

La plupart de ces vernis exigent, après leur application, un passage à l'étuve ou au four.

Les *bakélites* dérivent de la combinaison, avec condensation, de l'aldéhyde formique et du phénol;

Cette réaction donne une substance généralement pâteuse qui par chauffage se transforme en bakélite, substance dure, peu fusible, très difficilement soluble dans les dissolvants usuels.

On recouvre donc généralement les pièces de la substance initiale que l'on traite ensuite à l'autoclave.

La bakélite, peu élastique à l'état pur, peut être améliorée à ce point de vue par addition de matières fibreuses.

Les *émaux* sont des mélanges de silicates, ou de silicates et de borates et parfois de phosphates, ces corps étant constitués non seulement par des combinaisons chimiques définies, mais aussi par des dissolutions mutuelles.

On ajoute, par fusion, aux borates et silicates alcalins solubles, des borates et silicates alcalino-terreux; les produits sortes de verres sont insolubles; ces verres sont transformés en émaux par addition d'une substance opacifiante et colorée convenablement choisie.

Les substances opacifiantes les plus courantes sont : le bioxyde d'étain, l'oxyde de plomb, l'oxyde titanique, l'oxyde salin d'antimoine, le phosphate tricalcique, le kaolin.

Quant aux couleurs, elles sont obtenues par addition de sels métalliques très divers : sels de fer, cuivre, plomb, antimoine, cadmium, cobalt, chrome, manganèse, etc...

L'application d'un émail est presque toujours précédée de celle d'un « contre-oxyde », émail peu fusible de base; puis on met l'émail au pinceau ou au pistolet, ou encore « au poudré » pour les produits très fusibles; et l'on termine par la cuisson.

La caractéristique physique importante pour ce traitement est évidemment la température de fusion, fonction de la composition chimique et qui, d'un émail à un autre, varie dans de grandes limites.

Les écueils principaux dans l'emploi des émaux sont toujours les mauvaises adhérences, et, pour les pièces exposées à des variations de température, les différences de dilatation.

L'étude de tous ces produits de recouvrement n'a d'ailleurs été abordée que depuis peu de temps du point de vue scientifique, et de nombreuses industries utilisent encore des formules de mélanges remontant à des temps fort reculés; on constate néanmoins à l'heure actelle un début de sérieuse évolution vers la recherche de perfectionnements.

Les conditions exigées de tous ces enduits sont nombreuses et, pour de nombreux produits, contradictoires.

Parmi les plus importantes, citons : l'adhérence, la dureté et la résistance au frottement, le brillant durable, la bonne tenue à la corrosion, des effets de dilatation qui suivent ceux du support dans l'application et dans l'emploi, de l'élasticité en cas de déformation, etc...

Souvent il faut, pour répondre à ces desiderata, plusieurs couches superposées de produits différents.

Parmi les innovations relativement récentes, signalons :

— les laques cellulosiques et nitrocellulosiques, dures et élastiques, susceptibles d'un beau poli, qui exigent pour leur application directe une surface de qualité; le séchage est généralement effectué vers 50°; parfois, il faut un étuvage vers 75 à 100°;

— les enduits phénolés, de mise au point toute récente, contre les corrosions par l'eau de mer;

— les laques antiacides, employées avec succès pour la protection des bacs et paniers de décapage et qui donnent des résultats réellement remarquables, avec un appréciable abaissement des prix de revient tant au point de vue conservation des matériaux que non-altération des bains.

Dans le domaine des émaux, peu de nouveautés quant aux émaux proprement dits; mais le problème du bon « accrochage » de l'émail sur son support, problème dont les fondeurs de fonte connaissent bien toute l'acuité, est aujourd'hui résolu sur alliages ferreux par la *Parkerisation* dont nous parlerons plus loin. Ce procédé nouveau, entraînant en plus de l'adhérence, une réelle amélioration de la résistance à la corrosion est d'ailleurs aussi bien applicable pour les peintures, laques et succédanés divers que pour les émaux.

Enfin, la méthode du pistolet se vulgarise de plus en plus pour l'application de tous ces produits, au détriment des procédés au pinceau et au trempé.

Les avantages de cette méthode sont importants : les pistolets modernes, fonctionnant avec double réglage de l'air et de l'enduit sous des pressions de 2 à 4 kg, permettent, entre les mains d'un ouvrier entraîné, des rendements considérables et de grandes régularités d'exécution.

Dans le cas de charpentes ajourées et en place pour lesquelles les pertes d'enduit deviennent importantes, la méthode est inapplicable par suite d'un prix de revient trop élevé.

H) *Déplacement métallique chimique, sans courant électrique extérieur.*

Le procédé consiste simplement dans l'immersion des pièces, sans emploi de source extérieure de courant électrique, dans une solution d'un sel métallique convenable, dont le métal est déplacé par celui de la pièce et se dépose sur celle-ci.

Si la couche déposée dès les premières secondes est imperméable, l'opération s'arrête puisqu'il n'y a plus contact entre la solution et le métal de la pièce, et le revêtement obtenu est d'une épaisseur infime; sa protection est donc illusoire.

Si la couche déposée est au contraire perméable, la réaction se poursuit, mais c'est la surface des pièces servant de base au dépôt qui se dissout, et cela provoque la désagrégation du revêtement; d'où protection nulle.

Un procédé plus perfectionné consiste à constituer dans une solution du métal à déposer, une pile en court-circuit, dont la pièce à recouvrir est le pôle positif, le pôle négatif étant réalisé par une plaquette d'un métal électropositif par rapport au métal de la solution et au métal de la pièce.

Ici, c'est l'anode qui se dissout seule et l on peut théoriquement donner de l'épaisseur au recouvrement.

Mais pratiquement, l'opération est beaucoup trop longue, le métal de l'anode altère vite la solution en se dissolvant et le procédé n'est pas viable en présence des méthodes électrolytiques, pour les dépôts d'épaisseur non infime.

Aussi les procédés en question sont-ils seulement appliqués pour les revêtements infiniment minces : étamage, nickelage, argenture et dorure de bijouterie de pacotille, cuivrage de pièces bon marché, cuivrage des barres et fils d'acier avant étirage.

Cette dernière application est la seule importante au point de vue industriel.

On opère en bain acide très dilué (environ 1 % de sulfate de cuivre et 1 % d'acide libre); les pièces doivent passer rapidement dans le bain, sans quoi le dépôt est pulvérulent.

Au lieu de bains, on utilise parfois des pâtes afin de faciliter encore l'opération.

C'est sur ce principe qu'est basée la méthode de bronzage des aciers utilisant un mélange de trichlorure d'antimoine et d'huile d'olive.

On applique la pâte avec un tampon d'étoffe, on laisse plusieurs heures en contact, puis on essuie afin d'enlever le chlorure de fer; l'opération est recommencée jusqu'à obtention d'un aspect satisfaisant.

La protection contre la corrosion est à peu près inexistante.

Sur ce principe est basé un procédé de protection contre la corrosion, procédé encore peu étudié. Il consiste à mettre au contact de pièces immergées à protéger, des éléments plus électro-positifs.

Par exemple, dans l'eau de mer, l'attaque des aciers, du duralumin, est arrêtée ou tout au moins nettement freinée par la présence de zinc ou mieux de cadmium.

Il faut naturellement choisir un élément qui ne disparaisse que lentement et dont l'attaque n'engendre pas de composé réduisant ou supprimant l effet galvanique initial; il faut d'autre part que la modification des conditions extérieures ne renverse pas le sens du courant.

Enfin, il est indispensable d'avoir, pour une protection efficace, une certaine densité minimum de courant; lorsque cette densité est insuffisante, l'immunisation se localise au voisinage de l'élément ou des éléments anodiques, surtout si le milieu est peu conducteur.

Il y a certainement, dans ce principe, d'intéressantes possibilités d'applications.

1) *Procédés purement chimiques.*

Ici, l'on utilise une réaction purement chimique; dans la plupart des cas : parkerisation des alliages ferreux, bronzages des aciers, bleuissage de la fonte, patinage des bronzes, décoration de l'alu-

minium, la nature du métal de base intervient en premier ressort dans le mécanisme de la réaction, et à chaque genre de métal ou d'alliage à traiter, correspondent des procédés différents.

Il n'est donc pas possible, dans ces cas, de donner de directives d'ensemble.

Toutes ces méthodes, sauf la parkerisation dont la protection est réelle, ont seulement pour but une amélioration d'aspect, l'effet anticorrosif étant nul ou faible.

J) *Dépôts métalliques électrolytiques.*

Le principe est bien connu : pièces en cathode — électrolyte : sel du métal à déposer avec additions facilitant ou régularisant le dépôt — anodes neutres ou en métal à déposer.

Si toutes les conditions de l'opération sont bien réglées, le passage du courant provoque le dépôt, sur les pièces, de l'ion métal, lequel forme un recouvrement.

Lorsque les anodes sont insolubles, il faut régénérer périodiquement l'électrolyte qui s'épuise peu à peu.

Dans le cas des anodes solubles, la molécule électrolytique dissociée se régénère continuellement par combinaison de l'anion et du métal de l'anode, et c'est l'anode qui s'use; l'électrolyte sert simplement de véhicule au métal de recouvrement pour le faire passer de l'anode aux surfaces des pièces.

Ce domaine des dépôts electrolytiques est l'un des plus importants; il est aussi l'un des plus anciens, et c'est sans doute la raison pour laquelle ces opérations étaient encore récemment conduites de manière fort empirique.

Il faut dire aussi que leur étude est très complexe en raison du grand nombre de facteurs qui interviennent : composition, température, régénération, circulation de l'électrolyte; pureté, état et forme des anodes; forme et mouvement des pièces; voltage, densité de courant; dimension des cuves et des attaches; distance relative des électrodes; insufflation d'air, etc., ceci sans compter la conduite proprement dite de l'opération.

Aujourd'hui, on sait réaliser au mieux les dépôts courants, ainsi que les dépôts complexes devant lesquels on avait échoué autrefois.

Pour mener l'opération à bien, il faut utiliser des méthodes de

contrôle, comme les déterminations de pH, et connaître tous les facteurs de l opération, *en particulier la composition exacte des électrolytes.*

Nous ne reprendrons pas ici les théories de l'électrolyse; leur étude, pour être complète, nous entraînerait trop loin et nous renverrons pour cela aux ouvrages spécialisés; nous nous bornerons à résumer les notions d'ensemble les plus importantes et les plus modernes sur la pratique des opérations.

Préparation de la surface de base. — Nous avons déjà résumé les notions essentielles sur le décapage; celui-ci doit être d'autant plus poussé que le dépôt est plus difficile à « accrocher »; cette difficulté provient soit de la structure ou de l'oxydabilité du métal ou de l'alliage de base, soit de la nature du couple : métal de base-métal à déposer.

Une préparation spéciale après décapage est même parfois nécessaire : c'est ainsi que, avant argenture et dorure, on amalgame souvent les pièces par traitement dans une solution de mélanges de cyanures de mercure et de potassium. De même, le décapage-cuivrage et le décapage-cadmiumage, dont nous avons déjà parlé, servent non seulement comme indicateur de fin de décapage, mais aussi comme amorce au dépôt ultérieur.

Choix des caractéristiques de dépôts. — Sous-dépôts. — En première analyse, les différents métaux ou alliages sont plus ou moins difficiles à recouvrir : le cuivre et ses alliages sont réputés comme les plus commodes à traiter, puis viennent les aciers, les fontes (qui présentent des difficultés à cause du graphite libre), l'aluminium et les alliages légers (précautions à prendre déjà signalées), le magnésium et les alliages ultra-légers qui, eux, sont assez difficiles à recouvrir correctement.

En effet, pour ces derniers, le sablage laisse des incrustations de grains de sable par suite d'une dureté insuffisante du métal ou de l'alliage, et les décapages chimiques ne donnent pas de résultats corrects en raison de la très grande altérabilité de ces métaux ou alliages.

En seconde analyse, certains couples métal de base-métal à déposer, sont pratiquement impossibles à réaliser.

C'est ainsi que le nickelage et le chromage directs de l'aluminium

et de ses alliages, le chromage direct des aciers, ne permettent pas d'obtenir des résultats industriels constants.

Il faut alors intercaler un dépôt primaire qui donne soit l'adhérence, soit l'opacité, soit les deux.

Le cuivrage est bien connu en vue de telles sous-couches.

Dans certains cas, on aura avantage à remplacer ce cuivrage par un cadmiumage.

Quelquefois, le métal définitif ne viendra qu'en troisième : sur certaines pièces d'acier, on fait un cuivrage, puis un nickelage, avant de chromer.

Il faudra naturellement régler soigneusement les caractéristiques de ces diverses opérations et, en particulier, bien préciser par l'expérience les épaisseurs relatives de ces dépôts successifs.

On opérera en anodes solubles ou insolubles, ce dernier cas étant le moins fréquent et n'ayant guère que le chromage comme exemple.

Enfin, suivant les métaux ou alliages de base, la nature de l'électrolyte variera. Les bains alcalins ou les bains acides peuvent ne pas convenir; il faudra parfois, pour déposer un métal donné, opérer dans deux bains successifs, de nuance et de composition différentes, de ce métal : le premier dépôt donnant une couche très mince qui isolera de la surface de base le deuxième bain, lequel fournira l'épaisseur.

Dans chaque cas opératoire, on aura donc des conditions particulières à envisager, aussi ne donnons-nous ci-après que des directives d'ensemble et des caractéristiques *moyennes* pour les différents dépôts.

Étude des différents facteurs de l'électrolyse. — Nous allons envisager successivement les différents facteurs de l'opération et voir quelle est leur influence.

Il faut d'ailleurs bien noter que ces influences sont *en étroite connexion*.

C'est ainsi par exemple que les composition, concentration et température de l'électrolyte, la densité de courant, pour ne citer que les principaux, ont des actions intimement liées sur les résultats du traitement.

Lorsque l'un des facteurs devra être modifié, il faudra toujours envisager la répercussion sur les autres, afin de réaliser l'ensemble optimum de marche.

Qualités d'un bon dépôt. — Un bon recouvrement électrolytique doit avoir :

— *de l'adhérence :* à contrôler par emboutissage, pliage, brunissage ou corrosion directe;

— *un grain très fin ;* à vérifier à l'œil ou au microscope, ou par coupe micrographique;

— *de l'opacité ;* à contrôler par essai chimique de perméabilité ou par corrosion directe; cette opacité est fonction de la nature du dépôt, de son épaisseur et de la finesse du grain;

— *de l'homogénéité ;* il faut en plus avoir sur toute la pièce une bonne homogénéité de finesse de grain et d'opacité : il arrive que sur les angles et les coins des pièces, on ait des dépôts spongieux ou pulvérulents très peu résistants à la corrosion, alors que le reste du recouvrement est correct;

— *une épaisseur convenable ;* l'opacité augmente lorsque l'épaisseur croît, mais on ne peut trop forcer cette épaisseur au delà d'une certaine limite sans élévation prohibitive du prix de revient et aussi parce que les difficultés d'adhérence s'amplifient. Il faut donc que pour cette limite maximum d'épaisseur, l'opacité soit réalisée, ou bien on doit recourir à une sous-couche opaque; le contrôle s'effectue par mesures précises ou par micrographie de coupes;

— *une épaisseur bien réglée* suivant les différents points de la pièce; certaines pièces, en effet, exigent des dépôts plus épais aux endroits plus exposés à l'usure; d'autre part, nous verrons plus loin que certains genres de dépôts ne s'effectuent que très mal dans les creux, causant une hétérogénéité inadmissible d'épaisseur; même genre de contrôle que ci-dessus;

— *de la dureté et de la résistance à l'usure ;* ces propriétés varient étrangement avec les caractéristiques de certains dépôts; l'étude en est difficile;

— *l'absence de fragilité ;* à contrôler comme l'adhérence ou par vieillissement;

— le plus souvent, un *brillant direct* aussi accentué que possible afin de réduire le travail d'avivage.

Composition de l'électrolyte. — On utilise, suivant le genre d'opération, des électrolytes alcalins, acides ou neutres. Les sels métalliques dissous seront simples ou complexes.

Les sels *simples*, comme le sulfate cuivrique dans le cuivrage donnent une décharge directe en ions métal.

La compacité du dépôt varie alors dans le même sens que la concentration de l'électrolyte; une trop grande dilution conduit à des dépôts spongieux et pulvérulents; c'est ce qui se passe lorsqu'une rapidité excessive de dépôt provoque un épuisement en ions métal au contact des cathodes.

Les remèdes les plus simples sont une réduction de la densité de courant ou une agitation du bain en vue de son renouvellement sur les pièces.

Les sels *complexes*, comme le sulfitocyanure de cuivre et de potassium conduisent à une double décharge, le dépôt étant formé par la réaction secondaire; ces sels sont presque toujours à base de cyanures doubles du métal à déposer et d'un alcalin.

La décomposition initiale libère le métal alcalin.

La seconde dissocie le reste de la molécule, envoie à la cathode le métal à déposer, l'anion secondaire redonnant le sel complexe avec le métal alcalin libre et s'il y a lieu le métal anodique.

Les dépôts obtenus à partir de ces sels complexes sont toujours plus homogènes et à grain plus fin que les premiers; nous verrons plus loin pourquoi.

Concentration de la solution en ions métal. — C'est là un facteur des plus importants : une concentration trop grande en ions métal provoque une cristallisation accélérée, avec gros grain; une concentration trop faible donne un appauvrissement rapide au voisinage des cathodes, avec les inconvénients déjà indiqués.

Pour avoir de la finesse dans le dépôt, il faut avoir un grand nombre de cristaux et non un grand nombre d'ions métal en présence de chaque cristal; il faut une décharge modérée, mais alors une régénération immédiate des ions métal déposés est indispensable.

La solution de ce problème réside dans une concentration relativement basse en ions métal avec une quantité suffisante de sel dissous du métal, lequel redonne des ions métal frais, d'où l'avantage des sels complexes qui répondent exactement à ces desiderata, ainsi que nous l'avons vu.

Certaines additions permettent la réduction de la concentration de l'électrolyte en ions métal.

Conductibilité électrique du bain. — Il la faut suffisamment grande pour diminuer la tendance aux dépôts rugueux et rendre l'opération économique; on l'élève par des additions.

Action des colloïdes et substances d'additions diverses. — En dehors des sels métalliques divers, acides libres ou alcalis, on ajoute souvent aux électrolytes des colloïdes, produits réducteurs, essences, huiles essentielles, etc...

Certaines de ces substances n'ont aucun effet réel sur la conductibilité et sur les concentrations en ions métal et ions hydrogène, et pourtant leur influence sur la nature du dépôt est indéniable.

Elles améliorent, souvent très fortement, la finesse du grain; leur mode d'action exact est encore obscur; un fait certain est que les colloïdes se portant sur les cathodes, élèvent la polarisation et la résistance.

En résumé, un électrolyte devra être composé de manière à réaliser au mieux : un pouvoir élevé de solubilité; une basse concentration en ions métal; une bonne conductibilité; enfin de la stabilité et de la résistance à l'hydrolyse et à l'oxydation ou réduction, et dans le cas d'anodes solubles, une corrosion anodique correcte avec un abaissement de la polarisation anodique.

La pureté des électrolytes devra être soigneusement surveillée, certaines additions involontaires ou impuretés, comme les sels de zinc dans les bains de nickelage, provoquant, même en proportion infime, une marche défectueuse.

Agitation du bain. — Le renouvellement de l'électrolyte au contact des cathodes exige parfois une agitation du bain; lorsqu'on opère par injection d'air, il y a lieu de prendre garde à l'altération possible de l'électrolyte, par exemple à la formation de carbonates dans des bains cyanurés; il faut aussi veiller à la présence de boues en suspension, d'où quelquefois nécessité d'une filtration.

Température du bain. — L'abaissement de température diminue la grosseur de grain; son élévation augmente la vitesse du dépôt, la solubilité de certains sels, la conductibilité électrique et diminue les occlusions d'hydrogène; cette élévation de température est donc avantageuse à ces divers points de vue.

Pour redonner de la finesse au grain, on élève la densité de cou-

rant, modification rendue possible par l'augmentation de concentration de l'électrolyte.

Lorsqu'une température élevée optimum est déterminée, en liaison avec les autres caractéristiques, il faut la maintenir dans une tolérance qui ne dépasse pas souvent ± 2°.

Quand on opère à température ordinaire, il faut veiller aux variations saisonnières de température susceptibles d'entraîner de graves rebuts.

Densité de courant. — Une élévation de cette densité augmente la finesse du grain, mais il ne faut pas exagérer, sans quoi on « brûle » le dépôt; celui-ci devient alors spongieux, présente des craquelures par suite d'un dégagement trop abondant d'hydrogène; la solution s'appauvrit trop vite sur les cathodes.

On doit régler la densité de courant par calcul préalable des surfaces des pièces.

La tension, mesurée au voltmètre, donne en effet des indications insuffisantes, les facteurs dont dépend la résistance pouvant donner lieu à variations.

Anodes. — La superficie des anodes devra être réglée de manière suffisamment approchée; elle est sensiblement égale à celle des cathodes.

On doit d'autre part veiller à la forme des anodes et à la position relative des anodes et des cathodes pour la bonne répartition des lignes de courant.

Nous savons que ces anodes sont tantôt solubles, tantôt insolubles; dans le second cas, les matériaux les plus utilisés sont le plomb, le fer et l'acier, le carbone. On ensache fréquemment les anodes dans une enveloppe d'étoffe afin de retenir les impuretés solides qui se détachent.

Enfin, dans le choix des anodes solubles, diverses considérations entrent en ligne de compte pour régler correctement leur dissolution : d'abord la pureté du métal, les impuretés ségrégées activant toujours la vitesse de dissolution, ensuite l'état : fondu, recuit, écroui. Le métal recuit s'attaque moins vite; on pourra d'autre part agir sur la dissolution par des additions dans l'électrolyte.

Ces diverses caractéristiques varieront suivant le genre d'opération.

Répartition du métal déposé. L'épaisseur déposée n'est pas mathématiquement uniforme aux différents points de la pièce.

Elle est en relation avec la répartition des lignes de courant qui dépend elle-même, entre autres facteurs, de la forme, de la distance et de la position réciproque des anodes et des cathodes.

La forme des pièces, suspendues en cathodes, intervient donc : les saillies, coins et angles prêteront toujours à une concentration des lignes de courant, d'où parfois en ces régions, des dépôts noircis, spongieux, brûlés; les creux au contraire présenteront des recouvrements d'épaisseur réduite.

Cette hétérogénéité variera grandement d'un électrolyte à un autre; elle sera favorisée par les fortes densités de courant.

Le cuivre, le cadmium, donnent des dépôts assez homogènes, même dans les creux; on dit qu'ils ont un bon pouvoir de pénétration; le chrome, au contraire, pénètre très mal, d'autant que l'on est obligé d'opérer à température élevée sous de très hautes densités.

Les remèdes aux défauts de pénétration sont les suivants :

— généralement une modification de la densité de courant;

— une légère agitation mécanique ou une circulation, convenablement dirigée, de la solution;

— une diminution de la concentration en ions métal;

— une augmentation de la conductibilité du bain et de la polarisation cathodique, par exemple à l'aide de certaines additions à l'électrolyte.

Il faut à ce sujet veiller à l'action multiple de certains facteurs.

Par exemple, si l'on essaie d'élever la température, on augmentera bien la conductibilité, mais on abaissera la polarisation cathodique et ce dernier effet sera presque toujours plus intense que le premier, d'où comme résultante une diminution du pouvoir de pénétration, contraire au but cherché.

Enfin, un remède, d'un ordre un peu différent, est l'emploi d'anodes de forme modifiant la répartition des lignes de courant, par exemple des anodes avec saillies dirigées vers les creux des cathodes.

On emploie plus rarement des diaphragmes, convenablement placés, non reliés aux sources de courant, ou encore des cathodes auxiliaires de garde qui prennent sur elles une partie des lignes de courant dans les régions où celles-ci sont trop denses; ces ca-

thodes de garde sont des fils ou petits éléments de tôle découpée, reliés aux cathodes ou à leurs attaches.

Parfois, on cherchera au contraire à amplifier l'épaisseur du dépôt en certains points des pièces; les mêmes moyens seront utilisés.

Effet de l'électrolyse sur le métal ou l'alliage cathodique ou sur le dépôt. — L'action des gaz naissants a déjà été notée à propos des décapages électrolytiques.

Les dégagements trop abondants d'hydrogène provoqueront des tensions dans les dépôts, d'où fragilité et craquelures; les fortes intensités favoriseront ce défaut.

Quelquefois, pour ne pas faire trop d'occlusions dans le métal ou l'alliage de base ou à la naissance du dépôt, on fait une première opération dans un bain dégageant peu, puis on passe au bain définitif, ou bien l'on fait varier les caractéristiques électriques au cours de l'immersion. Cet effet gazeux est relié à l'acidité du bain que l'on peut régler parfois par des additions convenables; la détermination colorimétrique du pH de la solution permet de suivre cette acidité.

Dans certains cas, le problème direct reste insoluble et l'on doit « dégazer » : les chauffages légers peuvent suffire, ou bien l'on utilise la méthode récente de von Bosse : elle consiste, en un traitement des pièces dans le vide, l'hydrogène occlus étant entraîné par des effluves électriques entretenues par des courants alternatifs à haute tension.

Ce procédé a été mis au point pour le dégazage des sous-couches et couches du chromage.

Matériel d'électrolyse.

Cuves. — Les cuves sont faites, soit en bois bien jointé, protégé ou non par une couche à base de brai ou par un doublage, soit en plomb pur (exempt d'arsenic), soit en tôle d'acier doux, soit en fonte, émaillée ou non, soit en ciment, grès ou ardoise.

Arrivées du courant. — Le courant arrive par des tubes de cuivre ou mieux de laiton, convenablement isolés.

Les anodes et les cathodes sont suspendues à des crochets en cuivre ou en laiton.

Parfois les crochets sont émaillés ou recouverts d'une laque isolante, sauf à l'endroit des contacts, afin qu'ils restent passifs dans l'opération; pour les petites pièces, on réalise des accrochages en chapelets, en rateliers ou en raquettes afin d'augmenter le rendement; les contacts doivent toujours être soigneusement réalisés et maintenus très propres; enfin, les arrivées de courant doivent être de section suffisante, surtout lorsqu'on fonctionne sous une forte intensité (chromage).

Anodes. — Les anodes sont généralement des plaques du métal à déposer; quelquefois on emploie des bagues ou des rondelles du métal, que l'on enfile sur une tige de cuivre plombée.

Dans le cas des anodes insolubles, c'est parfois la cuve elle-même en tôle d'acier ou chemisée de plomb, qui constitue l'anode.

Chauffage des électrolytes. — Ce chauffage est effectué par des tuyauteries d'eau chaude ou de vapeur, ou au gaz, ou par des tubes fermés contenant des résistances électriques, et qui plongent dans les cuves.

Agitation, circulation, filtration, épuration. — On peut opérer l'agitation du bain par injection d'air, moyennant les précautions déjà indiquées; ou bien les pièces sont elles-mêmes agitées ou déplacées mécaniquement; la circulation, la filtration et, s'il y a lieu, l'épuration de l'électrolyte sont réalisées au moyen d'une pompe et d'un appareillage convenable; lorsqu'on opère en bain chaud, on peut placer le mode de chauffage en un point de cette circulation.

Réserves sur pièces. — On peut empêcher le dépôt de se produire en certains points des pièces, par application préalable d'un enduit imperméable et insoluble.

Bains toxiques. — Certains bains étant violemment toxiques (chromage), des précautions d'hygiène doivent être prises : fermeture hermétique des cuves pendant l'opération, avec aspiration mécanique des vapeurs; manipulations à l'aide de gants de caoutchouc; parfois masques respiratoires.

Disposition des ateliers. — L'organisation des ateliers doit être rationnelle pour la bonne succession des diverses opérations : décapages, rinçages, dépôts proprement dits, lavages.

L'électrolyte entraîné sur les pièces à la sortie du bain est généralement récupéré dans une première cuve de lavage.

Certains dépôts exigent des séparations dans les ateliers; par exemple les bains de chrome doivent être isolés de ceux de nickel, de crainte de contamination de ceux-ci par les vapeurs.

Dans les grandes installations, lorsque l'opération est rendue rapide par de grandes vitesses de dépôt en bain chaud et sous forte intensité, on réalise un déplacement continu automatique des pièces, un rail et des chariots aériens provoquant mécaniquement le déplacement horizontal dans les bains et le déplacement vertical et horizontal pour passer d'une cuve à une autre; les cuves ont alors des longueurs proportionnées à la durée de séjour.

Début d'un bain. — Un bain neuf ne donne pas toujours un bon dépôt dès sa mise en route; il faut le « vieillir »; un moyen assez pratique est de mettre en cathodes une partie des anodes et de fonctionner ainsi pendant quelques heures en permutant le dispositif.

Opération au tonneau. — Les petites pièces étaient autrefois traitées dans des paniers, mais les points de contact donnaient des défauts malgré une agitation périodique. On opère maintenant dans des cylindres ajourés immergés dans l'électrolyte, ou dans des cylindres fermés contenant le bain, ou dans des tonneaux inclinés de forme et de disposition analogues à ceux décrits à propos du décapage.

Tous ces cylindres ou tonneaux tournent autour de leur axe: dans le premier cas, l'anode est extérieure et l'arrivée de courant sur les pièces se fait par des barres fixées au cylindre: dans le deuxième cas, l'axe du cylindre est horizontal et matérialisé par l'anode; les deux sections droites sont en matière isolante.

La portion cylindrique, métallique, généralement en aluminium poli, amène le courant aux pièces.

Le dispositif du tonneau incliné est analogue.

Dans la rotation, le frottement des pièces les unes contre les autres provoque une sorte de brunissage du dépôt.

Les différents genres de dépôts électrolytiques.

Cuivrage. — Les applications du cuivrage sont fort nombreuses. Le plus souvent, ce dépôt sert de sous-couche à des nickelages, chromages, ou autres recouvrements, pour réaliser soit l'adhérence, soit l'opacité.

On l'utilise aussi sur une grande échelle pour les réserves dans la cémentation de l'acier par le carbone.

Les cuivrages peuvent être classés en trois catégories : le décapage-cuivrage, le cuivrage d'épaisseur normale, le cuivrage « à épaisseur »; dans ce dernier cas, on cherche l'opacité.

Un très grave inconvénient du cuivrage, pour les dépôts sur alliages ferreux, est son action corrosive accélératrice; l'opacité n'étant effective que pour une forte épaisseur, il y a là une source d'altération grave, et c'est l'une des raisons pour lesquelles le cadmiumage a déjà, dans une certaine mesure, supplanté le cuivrage.

Le cuivrage s'effectue en bain acide ou basique.

En bain acide, on emploie une solution de 150 à 200 gr de sulfate de cuivre, avec 50 à 100 gr d'acide libre, pour un litre d'eau; densité de 0,5 ampères/dcm^2 environ.

La plupart des métaux ou alliages peuvent être traités directement dans ces bains acides.

Les *bains basiques* sont presque toujours des bains de cyanures : ils contiennent pour un litre d'eau 15 à 25 gr de cyanure cuivreux, 20 à 30 grammes de cyanure de sodium (ou 25 à 35 gr de cyanure de potassium), 15 gr de carbonate de soude, 5 gr de sulfite ou bisulfite de soude ou 2 gr d'hyposulfite de soude.

Quelquefois, on part de carbonate, sulfate ou acétate de cuivre.

Le sulfitocyanure de cuivre commercial est un mélange de cyanure de cuivre, cyanure alcalin et sulfite de soude. Un faible pourcentage d'un sel de plomb donne du brillant au dépôt.

Densité de courant : 0,5 ampères/dcm^2 en moyenne.

Tous les métaux et alliages courants peuvent être traités en bain alcalin; pour l'aluminium et ses alliages, il vaut mieux cependant employer les bains acides.

Le défaut des bains alcalins est leur prix élevé; aussi, pour les dépôts épais, emploie-t-on toujours les bains acides; même pour

le cuivrage de réserve de cémentation, après un quart d'heure environ de dépôt en bain de cyanure, on passe au bain acide pour arriver à une épaisseur de 2/100 mm environ.

Ces bains peuvent donner lieu à des dépôts plus rapides en élevant la température, la concentration et la densité de courant.

Quant au décapage-cuivrage, effectué dans des bains très pauvres en cuivre et très chargés en cyanure alcalin, on opère sous une haute densité de courant, vers 75 à 80°, avec des anodes en fer.

Nickelage. — Le nickelage est un mode de recouvrement fort répandu; il donne un bel aspect; on l'emploie presque toujours directement sur alliages de cuivre, étain et plomb.

Sur alliages ferreux, sur l'aluminium et alliages légers on utilise une sous-couche de cuivre ou de cadmium.

Malheureusement, la protection donnée par le nickelage contre la corrosion est faible lorsqu'on ne prend pas de précautions spéciales. Sous les épaisseurs habituelles, de l'ordre de 1/100 à 2/100 de millimètre, le nickelage est toujours poreux, même lorsqu'on opère avec tous les soins désirables; et *a fortiori* quand on fonctionne empiriquement, sans contrôler la marche des bains, — cas encore bien fréquent — on a une porosité encore accentuée.

Il faut en plus tenir compte du fait que le nickel, comme le cuivre, est plus noble que le fer. Quand on utilise ces métaux pour le recouvrement, la corrosion déjà facilitée par la porosité est activée.

La solution réside, soit dans l'emploi d'une sous-couche épaisse de cuivre, méthode à peu près abandonnée aujourd'hui; soit dans l'emploi d'une sous-couche mince de cadmium, rigoureusement opaque, qui intercepte toute action corrosive de l'atmosphère ou du nickel sur la surface de base (méthode française); soit dans l'adoption d'un dépôt épais de nickel, de l'ordre de 2,5 à 3/100 de millimètre, ce qui supprime de manière pratiquement complète la porosité totale de la couche (méthode américaine).

Ces deux dernières solutions sont très efficaces, mais elles conduisent toutes deux à une élévation du prix de revient. D'abord, toutes deux sont d'emploi assez délicat et nécessitent des contrôles, obéissant ainsi à la loi bien fréquente de la complication dans le perfectionnement.

Ensuite, elles exigent soit l'emploi de cadmium, métal plus cher

que le cuivre, soit une quantité plus grande de nickel. Il ne faut pas oublier qu'une couche unique de 3/100 de millimètre d'épaisseur et de 1 m^2 de surface, en nickel, pèse un peu plus de 250 gr.

D'autre part, le nickelage à épaisseur nécessite, pour une exécution rapide, une préparation très poussée de la surface, une température de bain élevée et de fortes densités de courant. En revanche, il prête à l'installation de manutention automatique des pièces ce qui permet, dans les ateliers importants, une rapide économie sur la main-d'œuvre, après amortissement des frais de première installation.

Quoi qu'il en soit, pour éviter en service un nickelage défectueux, supprimer la corrosion des pièces et les nettoyages, on doit consentir à une dépense plus élevée à l'origine en vue d'une protection améliorée et ne pas se rebuter devant des perfectionnements quelque peu complexes, mais efficaces.

Bains de nickelage. — Les bains de nickelage sont presque toujours à base de sulfate; ils se composent en moyenne, pour un litre d'eau, de :

— 150 à 200 gr de sulfate de nickel;

— 15 à 20 gr de sulfate d'ammonium (pour la bonne concentration en ion métal et pour la conductibilité);

— une dizaine de grammes de chlorure de sodium (pour la corrosion anodique);

— 10 à 20 gr d'acide borique (pour le réglage de l'acidité);

— une faible addition colloïdale ou d'essence complexe, ou simplement d'un sel de cadmium quand on veut du brillant.

On marche aux alentours de 0,5 amp./dcm^2, avec un pH compris le plus communément entre 5,4 et 6,3; si on l'abaisse en modifiant convenablement l'électrolyte (on peut descendre jusqu'aux environs de 4), il faut relever la densité; le grain devient plus fin, dur et brillant, mais aussi plus fragile; si on élève au contraire le pH jusque vers 7, il faut abaisser la densité, mais le dépôt devient très mat.

Les bains doivent être périodiquement neutralisés par addition de carbonate d'ammonium ou de carbonate basique de nickel qui en même temps régénère en métal.

L'impureté la plus dangereuse est le zinc; à un degré moindre, le cuivre; ces impuretés sont neutralisées par addition de carbonate de nickel et d'ammonium, filtrage et décantation du bain.

On peut néanmoins arriver à réaliser des nickelages directs du zinc et de ses alliages en introduisant les pièces dans le bain sous une forte densité de courant, que l'on maintient pendant le temps nécessaire à la formation d'un dépôt suffisant, puis on termine normalement l'opération en abaissant l'intensité.

De plus, on remplace le sulfate d'ammonium par du chlorure de nickel, et on ajoute 50 à 60 gr de citrate de soude qui entrave

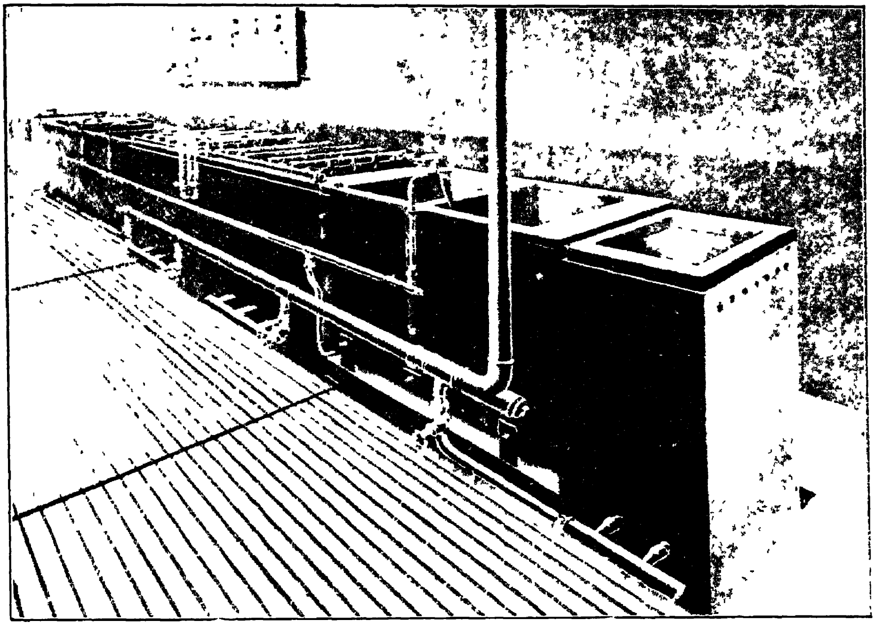


Fig. 130

Installation de nickelage rapide à épaisseur

De gauche à droite :

Bac de dégraissage électrolytique à l'ébullition.
Bac de rinçage.
Bac de décapage électrolytique à l'acide sulfurique.
Bac de rinçage.
2 cuves de nickelage de chacune 300 litres, équipées en série.
Bac de récupération.
Bac de rinçage en eau courante
Bac d'eau chaude.

la réaction du zinc sur le sulfate de nickel (densité initiale : 3 à 5 amp./dcm^2).

Pour le nickelage sur cadmium, on doit soigneusement éviter toute altération entre les deux dépôts, et opérer dans un bain de

nickelage neutre, plutôt très légèrement acide que très légèrement basique.

Quant au nickelage à épaisseur, les bains sont ainsi composés :

Sulfate simple de nickel.	250 à 450 gr par litre
Chlorure de nickel cristallisé.	22 —
Acide borique	22 —
Nitrate de nickel en solution à 20 %	0,5 à 1 cm³

La concentration en sulfate de nickel doit être d'autant plus grande que la densité de courant, à choisir entre 5 et 15 amp/dcm² est plus élevée. La température doit rester comprise entre 48 et 51° C.; l'acidité doit correspondre à un pH de 5,3 à 5,7. L'agitation mécanique ou par barbotage d'air est à peu près indispensable.

De cette façon, sous forte densité de courant, un dépôt de 2,5/100 de millimètres d'épaisseur est réalisé en un quart d'heure.

Lse précautions à prendre, en particulier pour le décapage, ont déjà été signalées.

La figure 131 montre une installation française de nickelage épais, avec une seule cuve de 300 l, qui a permis de supprimer cinq bains froids ordinaires de 1.200 l chacun, pour un rendement technique nettement amélioré et avec une diminution de main-d'œuvre.

Zingage. — Ce genre de dépôt, par voie électrolytique, est peu répandu, et cela est surprenant, car sa valeur au point de vue protection est très appréciable; l'opacité de la couche est bonne; de plus, le zinc est passif par rapport au fer, au cuivre, à l'aluminium et ceci est fort important pour les recouvrements de ces métaux et de la plupart de leurs alliages.

Si le zingage pouvait facilement remplacer le cuivrage avant nickelage, il aurait là un vaste champ d'application, mais nous avons vu que l'opération était difficile.

A l'heure actuelle, le zingage perd une partie de son intérêt devant le cadmiumage de mise au point récente.

Le zingage ne garde d'applications possibles que pour le revêtement bon marché de pièces de grandes séries, mais son domaine d'extension est là encore fort intéressant.

On utilise pour le zingage soit des solutions acides à base de sulfate, soit des solutions basiques à base de cyanures.

Les bains acides donnent des dépôts plus brillants, mais ont un moins bon pouvoir de pénétration ; ils contiennent, pour un litre d'eau, environ 250 à 300 gr de sulfate de zinc $Zn\,SO^4$, $7\,H^2O$, 15 à 30 gr de chlorure d'ammonium (pour élever la conductibilité), 15 gr d'acétate de sodium (pour régler l'acidité), et une addition pour le brillant, comme le glucose (une centaine de grammes) ou le sulfate d'aluminium (30 gr), lequel diminue en même temps la concentration en ions métal. La densité peut être élevée sans inconvénients jusqu'à 2,5 et même 3 amp. par décimètre carré.

Les bains alcalins, moins employés, renferment, pour un litre d'eau, 60 gr de cyanure de zinc et 23 gr de cyanure de sodium, ou 45 gr. d'oxyde de zinc et 75 gr de cyanure de sodium, avec une cinquantaine de grammes de soude dans le premier cas, une quinzaine dans le second.

On ajoute parfois un peu de carbonate ou de fluorure de sodium et un colloïde en très faible quantité. La densité de courant ne doit pas dépasser ici 2 amp. par décimètre carré.

Les anodes sont le plus souvent en zinc pur ; elles doivent être particulièrement affinées pour les bains basiques ; on emploie cependant parfois des anodes insolubles fabriquées à partir du coke de pétrole.

Cadmiumage. — Ce dépôt est seulement de mise au point récente parce que, jusqu'à ces toutes dernières années, le cadmium n'était guère qu'un produit de laboratoire.

Ce métal se trouve en très faible quantité dans les minerais de zinc, et sa récupération à partir des sous-produits était difficile et coûteuse par l'ancienne méthode d'élaboration du zinc par voie sèche.

Le nouveau procédé d'élaboration du zinc par voie humide électrolytique, fournit le cadmium comme sous-produit obligatoire, l'électrolyte devant être purifié en cadmium pour donner un dépôt de zinc compact.

Les conditions économiques ont été ainsi complètement modifiées et le cadmium est devenu un métal industriel.

L'étude récente et très complète des recouvrements électrolytiques de cadmium a révélé :

1° L'*adhérence tout à fait remarquable de ce recouvrement*, même sur aluminium et alliages légers, adhérence encore supérieure à celle du cuivrage ;

2° *Sa résistance à la corrosion ;* l'opacité est très accentuée, environ trois fois supérieure à celle du zingage, recouvrement déjà très peu perméable; de plus, le cadmium vient presque en dernier dans la liste des potentiels électrolytiques; de récentes expériences ont montré que cette autoprotection était encore supérieure à celle procurée par le zinc;

Enfin, ce métal est lui-même chimiquement très résistant; la tenue à l'eau de mer est à noter spécialement.

Quant au pouvoir de pénétration, il est l'un des plus élevés connus; la couleur est voisine de celle de l'argent, plus bleutée que celle du nickel qui paraît jaunâtre par comparaison.

Malheureusement, en présence de ces qualités, il y a lieu de souligner un grave défaut du cadmium : son manque de dureté; cette caractéristique est en effet pour lui intermédiaire entre celle de l'étain et du zinc, ce qui est peu; il en résulte une altération assez rapide des avivages, un ternissage mécanique se produisant au moindre frottement.

Il ne faut donc pas employer le cadmiumage *seul* sur des pièces dont le brillant doit être durable et qui sont exposées à l'usure, ou bien on doit lui superposer une couche de nickel, ou de chrome, ou successivement ces deux couches.

Il remplace ainsi très avantageusement le cuivrage, avec une adhérence, une opacité et un pouvoir de protection galvanique nettement améliorés.

Quant aux pièces dont l'aspect n'est pas primordial et qui sont protégées des frottements, le cadmiumage seul est le plus indiqué.

Les bains de cadmiumage les meilleurs sont alcalins, à base de cyanure. Nous pouvons distinguer, comme pour le cuivrage des bains de décapage-cadmiumage, des cadmiumages ordinaires, des cadmuimages à chaud.

Pour le décapage-cadmiumage, pour un litre d'eau : environ 6 gr de carbonate de cadmium, 25 gr de cyanure de potassium, 125 gr de soude; anodes en fer, densité de 5 à 8 amp par décimètre carré; température ordinaire.

Pour le cadmiumage ordinaire à froid, pour un litre d'eau : environ 12 gr de carbonate de cadmium, 36 gr de cyanure de potassium, 5 gr de phosphate de sodium, 7 à 8 gr de ferro-cyanure de potassium; anodes en cadmium; densité de 0,5 à 1 amp. par décimètre carré.

Pour le cadmiumage au tonneau, on peut marcher sous 2 à 3 amp. par décimètre carré, à condition de porter respectivement à 35 gr, 100 gr, 15 gr et 10 gr les quantités des quatre sels ci-dessus.

Enfin, pour le cadmiumage rapide à épaisseur. avec agitation du bain, on met, pour un litre d'eau : 30 gr de carbonate de cadmium, 50 gr de cyanure de potassium, 20 gr de soude; anodes solubles; densité de 3 à 4 amp. par décimètre carré; température : 48 à 52°.

Chromage. — La composition du bain est la suivante :

On a généralement, pour un litre d'eau : 250 gr d'acide chromique, 4 gr de sulfate de chrome, une quinzaine de grammes de carbonate de soude et une faible quantité d'acide borique pour donner du brillant.

Il est essentiel de maintenir la proportion $\frac{SO^4H^2}{CrO^3}$ aux alentours immédiats de 1/100; un excès de sulfate peut être facilement corrigé par l'addition bien dosée d'une émulsion fraîchement préparée de chromate de baryum (le sulfate de baryum se précipite et l'équivalent en acide chromique entre dans le bain). L'acide chromique utilisé doit être d'une grande pureté; des traces sulfuriques ne gênent cependant pas puisque la présence de cet acide est indispensable pour la bonne marche de l'opération.

L'emploi du chromage comporte à la fois de grands avantages et des inconvénients sérieux.

Les avantages sont les suivants :

— opacité et inattaquabilité chimiques remarquables, même dans les vapeurs sulfureuses à température élevée, supérieures à celle de tous les dépôts courants;

— dureté considérable, bien supérieure à celle du nickelage, de l'ordre de celle des aciers cémentés et trempés;

— très beau brillant durable, obtenu directement sans grandes difficultés lorsque la base avant chromage a été polie;

— bonne adhérence directe sur cuivre et alliages cuivreux; sur les autres métaux et alliages, une sous-couche de cuivre, ou mieux de cadmium, et parfois une couche intermédiaire de nickel est indispensable.

Mais, ces énormes avantages n'existent que lorsque le chromage

est très bien fait, et cette bonne exécution présente des difficultés réellement considérables :

— il faut d'abord des densités de courant élevées, de l'ordre de 20 amp. par décimètre carré; on arrive à descendre à 9 à 10, mais au prix d'une difficulté croissante de conduite du bain; les arrivées de courant et les attaches de pièces doivent évidemment être en rapport de ces fortes intensités;

— la bain ne fonctionne qu'à chaud; la température, de l'ordre de 50°, doit être maintenue à 2 ou 3° près;

— le bain est très corrosif, d'où l'obligation pour les ouvriers de porter des gants de caoutchouc; les vapeurs encourent le même reproche, ce qui exige une fermeture bien étanche des cuves, avec évacuation des fumées par aspiration; certaines usines obligent les ouvriers à mettre des masques;

— le dépôt, en bain immobile et avec anodes planes, se fait mal dans les creux des pièces; il faut, ou bien employer des anodes de forme, ou bien agiter le bain d'une manière convenable;

— la conduite du bain est fort délicate; la résistance de la pellicule de chrome est environ quadruple de celle du nickel; les caractéristiques de marche doivent donc être surveillées très soigneusement; le bain s'ionise très rapidement et un repos périodique est parfois nécessaire en cas de travail intense; il faut également maintenir soigneusement la composition de l'électrolyte lequel est une solution acide d'oxyde chromique supérieur, avec un certain nombre d'additions, notamment du sulfate de chrome, solution fonctionnant en anodes *insolubles* de fer ou mieux de plomb; la proportion d'hydrogène augmente vite dans le bain, obligeant parfois à des additions oxydantes, sans quoi l'écaillage et la fragilité du dépôt sont à redouter.

C'est pour le chromage que le procédé de dégazage de von Bosse, déjà décrit, a été inventé; en un mot, il est non impossible, mais très difficile de réaliser la constance de qualité dans la fabrication;

— le bain étant fortement acide, si l'on y plonge des pièces subissant des tensions internes, par exemple des objets trempés, on a fréquemment à déplorer des tapures conformément au processus connu.

Aussi, dans l'état actuel de la question, ne peut-on pas prévoir pour le chromage un développement intensif.

Ou bien, il sera convenablement exécuté, et les dépenses, en ce

cas importantes et indispensables, prohiberont son application pour les emplois courants;

Ou bien il sera réalisé sans précaution, et alors ses qualités, notamment l'opacité et la dureté, ne seront pas obtenues d'une manière industrielle et constante, et un bon nickelage prévaudra.

Argenture. — L'argenture est très employée en orfèvrerie et l'on traite directement — avec parfois, cependant, une amalgamation préalable — le cuivre et ses alliages (notamment le maillechort) ainsi que l'étain et ses alliages; pour les autres métaux, on procède avant argenture à un cuivrage ou cadmiumage.

Les pièces en cours d'argenture sont toujours agitées, par déplacement lent et continu; on opère avec anodes solubles, en bain froid ou chaud de cyanure.

On a, pour un litre de bain : environ 30 gr de cyanure d'argent et 30 gr de cyanure de sodium ou de potassium; on ajoute parfois une très faible quantité de sulfure de carbone pour donner du brillant; la densité de courant est de 0,3 à 0,5 amp. par décimètre carré pour les bains froids; on doit additionner régulièrement du cyanure alcalin pour maintenir aussi constante que possible la teneur en cyanure libre (20 à 25 gr par litre); la proportion en argent métal doit être de 22 à 25 gr par litre.

Quelquefois, avant le bain d'argenture, on passe les pièces dans un bain contenant très peu d'argent, et une forte proportion de cyanure alcalin et un peu de carbonate; cela correspond à une sorte de décapage argenture.

Dorure. — La dorure est appliquée directement sur l'argent et ses alliages, le cuivre et ses alliages (avec parfois amalgamation préalable).

Les autres métaux sont ou bien dorés directement en bain chaud, ou bien dorés au bain froid, après un premier recouvrement de cuivre, cadmium, nickel, ou mieux laiton dont la couleur ne tranche pas après usures locales de la dorure.

On utilise habituellement deux bains de dorure :

— d'abord un bain de charge qui donne l'épaisseur;

— ensuite un bain de teinte qui donne la couleur exacte voulue; les pièces y restent très peu de temps.

Dans la préparation de ces bains, l'or est dissous dans l'eau

régale (deux parties d'acide chlorhydrique pour une d'acide azotique); les acides en excès sont éliminés par évaporation.

Bain de charge. — La teneur en or métal est de 2 à 4 gr par litre, avec 10 à 30 gr de cyanure de potassium et 5 gr de phosphate de sodium.

On opère soit en bain froid, sous 0,1 à 0,3 amp. par décimètre carré, avec anodes solubles en or ou anodes insolubles en platine ou graphite, soit mieux, en bain chaud (50 à 80°), sous 0,2 à 1 amp. par décimètre carré, avec anodes insolubles en platine; les anodes d'or ne se dissoudraient pour ainsi dire pas en bain chaud; déjà en bain froid, il faut ajouter périodiquement du chlorure d'or à l'électrolyte.

Bain de teinte. — La couleur exacte est donnée par passage rapide dans des bains contenant, en plus de l'or : de l'argent pour avoir l'or vert, du cuivre pour avoir l'or rouge, du nickel pour avoir l'or blanc.

On agit d'autre part sur la densité de courant dont l'élévation donne des teintes plus foncées.

Le bain employé est de formule analogue à celle ci-dessus; l'argent est additionné sous forme de chlorure, le cuivre et le nickel à l'état de cyanures; les anodes sont constituées par l'alliage d'or à déposer, ou mieux sont en platine.

Dépôts électrolytiques d'importance secondaire.

COBALTAGE. — L'analogie de ce dépôt avec le nickelage est très grande, ce qui n'a rien de surprenant, vu le voisinage de ces deux métaux.

La résistance à la corrosion est analogue avec peut-être une opacité améliorée pour le cobaltage; par contre, le brillant est moins vif.

Le cobaltage ne peut être employé au contact de l'eau de mer en raison de l'avidité des insectes marins pour ce métal; le dépôt est très rapidement recouvert d'une abondante carapace de mollusques divers.

Les électrolytes de cobaltage sont à base de sulfate, comme ceux de nickelage, avec des additions analogues.

Le dépôt se fait directement ou indirectement suivant les métaux ou alliages supports, comme pour le nickelage.

Le prix de revient est élevé par suite de la cherté du métal.

Ferrage. — Cette opération, utilisée avec succès en métallurgie pure pour l'affinage ou l'obtention de fer électrolytique sur cathodes cylindriques rotatives, est très peu répandue au point de vue recouvrement.

On l'a proposée, mais sans grand résultat, pour recharger des pièces.

Il faut signaler l'avidité du métal pour les gaz et en particulier l'hydrogène de l'électrolyse, le dégazage nécessitant un recuit à température très élevée.

On utilise toujours des bains à base de sels ferreux, sulfate ou chlorure, avec peu ou pas d'acide libre; le sulfate permet d'opérer à basse température; le chlorure, exigeant des températures élevées, autorise par contre une solubilité, une conductibilité et des densités de courant plus grandes.

Les bains de sulfate contiennent, pour un litre d'eau : 250 à 350 gr de sulfate ferreux cristallisé, 150 à 250 gr de sulfate ou de chlorure de sodium, anodes en fer, faible densité de courant : 0,1 à 0,3 amp. par décimètre carré.

Les bains de chlorure renferment 300 à 500 gr de chlorure ferreux, autant de chlorure de calcium: on opère à 90°, sous des densités pouvant monter à 20 amp. par décimètre carré: anodes en fer.

Il faut réduire le plus possible et protéger la surface du bain en raison de la facile oxydation des sels ferreux.

Plombage. — Opération pour ainsi dire inutilisée pour les recouvrements, mais employée par contre pour l'affinage métallurgique du métal.

On emploie trois sortes de bains, en anodes solubles :

— à base de fluosilicate (procédé de Betts) :

Fluosilicate de plomb	170 gr	pour un litre
Acide fluosilicique.	70	
Gélatine	0,5	

Densité : 1 à 1,5 amp. par décimètre carré;

— à base de perchlorate (méthode de Mathers) :

Perchlorate de plomb	120 gr	pour un litre
Acide perchlorique	40	
Peptone	0,5	

Densité : jusqu'à 3 amp. par décimètre carré;

— à base de fluoborate :

Carbonate basique de plomb	150 gr	pour un litre
Acide fluorhydrique à 50 %	32	
Acide borique	14	
Gélatine	0,2	

Densité : de 1 à 3 amp. par décimètre carré.

ÉTAMAGE. — Procédé très peu utilisé en présence des autres méthodes de recouvrement par l'étain.

On l'emploie par contre pour l'affinage du métal et pour la récupération sur déchets de fer-blanc.

On opère souvent en anodes solubles, mais cela ne permet pas de maintenir la concentration, et l'on doit entretenir directement l'électrolyte.

Le bain est presque toujours à base de stannate de soude, avec une formule du genre de la suivante :

Chlorure stanneux	30 gr
Soude	75
Glucose	60

On opère à 50° environ sous 1 amp. par décimètre carré.

PLATINAGE. — Procédé lui aussi très peu fréquent.

La composition des bains évolue autour de celle autrefois indiquée par Roseleur et Lanaux :

Platine métal	4 à 5 gr	pour un litre
Phosphate d'ammonium	45 à 50 gr	
Phosphate de sodium	250 gr environ	
Acide borique	15 gr	

Les anodes, en platine, restent inattaquées; on opère vers 70°, sous 0,1 amp. dcm².

DÉPOT ÉLECTROLYTIQUE DIRECT D'ALLIAGES. — Les dépôts électrolytiques directs d'alliages sont toujours très difficiles à réaliser pour l'obtention de résultats constants.

Les solutions doivent avoir une composition telle que les métaux différents s'y déposent sous des tensions très voisines; et si l'on veut maintenir invariable la composition de l'alliage déposé, on est obligé de surveiller de très près l'évolution de celle du bain et les divers facteurs du traitement.

Ces dépôts sont d'ailleurs très peu répandus et pourtant certains d'entre eux comme ceux de cuivre et de nickel, de cuivre et d'argent, présenteraient un intérêt considérable; mais leur réalisation, souvent essayée, s'est heurtée à des difficultés jusqu'à maintenant insurmontées.

Seul le laitonnage a pris quelque développement grâce à la nature des deux métaux constituants et grâce aussi à la possibilité de maintenir d'une manière simple la composition du dépôt, par observation de sa couleur, en agissant sur la densité de courant.

La couleur des dépôts est d'ailleurs différente de celle des alliages de laiton de même composition, obtenus par coulée; un dépôt à 80 % de cuivre a la couleur du laiton à cartouches ordinaires à 67 % de cuivre.

Cette composition du dépôt est fonction de toutes les caractéristiques de l'opération.

On utilise habituellement un bain contenant les deux cyanures, soit pour un litre d'eau : 20 à 35 gr de cyanure de cuivre, 8 à 15 gr de cyanure de zinc, 35 à 45 gr de cyanure de sodium: la proportion du cuivre métal au zinc métal doit être maintenue aux alentours de 3 à 1; la quantité de cyanure libre doit être entre 2 et 5/10 de celle de cyanure combiné.

Les anodes sont en laiton et doivent avoir une très grande surface par rapport aux pièces; malgré cela, il faut entretenir l'électrolyte en sels métalliques; on opère à raison de 0,3 amp. dcm², vers 40 à 50°.

Les applications du laitonnage sont dûes à sa belle couleur dorée.

Le dépôt prend directement sur tous les métaux et alliages courants; son opacité est notamment supérieure à celle du nickelage ordinaire en bain froid.

K) *Oxydations anodiques.*

Cette méthode revient à mettre les pièces *en anodes* dans une solution convenable, en présence de cathodes passives. Le dégagement gazeux provoqué sur les pièces par l'électrolyse provoque à leur surface un effet chimique parfois très intéressant au point de vue aspect ou protection contre la corrosion.

Les deux seuls procédés de ce genre utilisés industriellement consistent pour les fontes dans l'emploi d'une solution de ferrite alcalin, pour l'aluminium et les alliages légers dans l'emploi d'une solution à base d'acide chromique et de chromates ou bichromates. On a production superficielle d'un film très mince d'oxyde anhydre, peu résistant dans le premier cas, très opaque au contraire dans le second.

TITRE IV

RECHERCHE ET CONTROLE CAHIERS DES CHARGES ET STANDARDISATION

CHAPITRE XIII

ORGANISATION DU LABORATOIRE — GÉNÉRALITÉS

On peut résumer le rôle du laboratoire d'usine de la façon suivante : *améliorer la fabrication et diminuer le prix de revient ;* mais, pour cela, il faut que l'organisation de cet élément indispensable soit parfaitement étudiée.

Comment préciser l'organisation générale du laboratoire dans une usine de construction?

Tout d'abord, une vérité évidente : le laboratoire doit être exactement adapté aux besoins qui le rendent nécessaire; ces besoins varient avec l'importance de l'usine, les modes de fabrication, la nature et le nombre des ateliers annexes (fonderie, traitements thermiques, soudure, etc.); donc, l'organisation devra être précisée dans chaque cas particulier; c'est dire que nous ne pourrons donner ici que des indications d'un ordre tout-à-fait général.

Comment ce laboratoire va-t-il s'encastrer dans les autres services de l'usine? Doit-il être autonome? Doit-il dépendre totalement, ou partiellement, des ateliers? Il est essentiel d'étudier à l'avance, et très soigneusement, les points de contact de ces divers organes : direction, laboratoire, fabrication; sans quoi des conflits

ne peuvent manquer de naître entre ce laboratoire et les chefs de service.

Voici quelles sont les directives généralement observées en France à ce sujet : deux cas sont à considérer :

Premier cas. — Usine d'importance moyenne ou faible :

Un laboratoire unique, dirigé par le chef de fabrication compétent en matière d'essais et de recherches; cette unité de commandement est extrêmement importante, nous dirons même indispensable; sans cela, le chef de fabrication ne sait pas ce qu'il peut demander au laboratoire, ou lui réclame des travaux impossibles; de son côté, le chef de laboratoire risque d'étudier des problèmes sans intérêt pratique; on arrive à des discordes entre ces deux hommes et à des résultats déplorables à tous points de vue.

Deuxième cas. — Usine importante :

D'abord un laboratoire central, sous la direction d'un chef placé sous les ordres immédiats du directeur technique; ensuite, de petits laboratoires divisionnaires, annexés aux différents ateliers (fonderie, traitements thermiques, soudure, machines-outils, contrôle final à la réception) et dirigés par les chefs de fabrication.

Le laboratoire central, puissamment outillé, doté de physiciens et de chimistes rompus aux méthodes scientifiques, a un double rôle : exécuter les recherches nouvelles, et venir en aide aux laboratoires annexes en cas de nécessité.

Les annexes, pourvues du matériel strictement nécessaire, avec un personnel très réduit, consciencieux, mais ordinaire, exécutent simplement les opérations de contrôle de leur département.

Cette dernière conception, assez grandiose, peut paraître, *a priori*, quelque peu exagérée. Elle est cependant adoptée par les grandes usines de construction des États-Unis et d'outre-Rhin.

Certaines industries se sont orientées vers une formule inspirée de cette dernière solution : création du grand laboratoire central sous forme intersyndicale, chaque firme possédant seulement dans ses usines une installation de contrôle courant de la fabrication, correspondant au premier cas envisagé; c'est là, à n'en pas douter, une présentation séduisante du problème.

Il ne faut pas, en effet, s'hypnotiser sur le contrôle seul de la

fabrication : il faut progresser, aller de l'avant; il faut pousser des recherches sur des points entièrement nouveaux, dans des domaines encore inexplorés, et pousser ces recherches d'une façon absolument scientifique, sans rien laisser dans l'ombre, en ne négligeant aucun facteur, aucune variable, conformément aux enseignements de notre grand maître, Henry Le Chatelier. Cette recherche est souvent longue, mais il faut, à toute force, en passer par là si l'on veut éviter tous les risques de côtoyer la solution sans la voir.

Ces deux principes importants — contrôle courant de la fabrication et recherches nouvelles scientifiquement conduites — étant bien établis et étant tous deux reconnus comme tout à fait indispensables, serrons le problème de plus près en étudiant successivement :

I. Les différents buts du laboratoire;
II. Son organisation du point de vue matériel;
III. Son organisation du point de vue personnel.

Nous adopterons dans cette description le cas d'un vaste laboratoire unique.

Il sera plus facile, en effet, de réduire le projet, en cas d'installation modeste, que de l'amplifier s'il en était autrement; et il sera également très simple d'en extraire la composition des petits laboratoires annexes si le constructeur adopte ce genre d'organisation.

§ 1. Les différents buts du laboratoire. — Essayons de les classer dans un ordre aussi rationnel que possible :

1° Rôle continu du laboratoire dans la fabrication normale :

a) *Matières premières.* — Tout d'abord, contrôle des matières premières, conformément aux spécifications des cahiers des charges.

Puis contrôle du classement de ces matières sur parc et en magasin.

Notons, en passant, que les échantillonnages doivent toujours être effectués par les soins du laboratoire.

b) *Fabrication proprement dite.* — *A la fonderie*, détermination des mélanges de sables, contrôle des modèles, détermination et contrôle de la composition des charges des fours, suivant les lots

des matières premières utilisées et les pièces à fabriquer, et détermination parallèle des caractéristiques de marche; étude des répercussions éventuelles sur les ateliers de traitement, contrôle du fonctionnement des divers appareils, fours divers, étuves, ventilateurs, etc., soit périodiquement, si l'on ne dispose pas d'enregistreurs continus des caractéristiques (températures, gaz de la combustion) à surveiller, soit par relevé des graphiques d'enregistreurs.

Aux ateliers de traitements thermiques, cémentation et soudure, réception s'il y a lieu des produits à l'arrivée, détermination des caractéristiques de marche et contrôle du fonctionnement des appareils comme ci-dessus.

c) *Produits.* — Essais sur produits divers, soit sur éprouvettes élaborées ou traitées séparément, soit directement sur les pièces, afin de contrôler l'élaboration ou l'effet des traitements.

Les processus de ce contrôle ont été suffisamment divulgués, particulièrement dans les traitements thermiques des obus, pour qu'il soit nécessaire d'insister plus longuement sur cette partie essentielle.

S'il y a lieu, contrôle des pièces finies ou assemblées, au point de vue emploi.

d) *Établissement de graphiques.* — Un des rôles du laboratoire est également d'établir certains graphiques de fabrication (différentes caractéristiques de marche) et de rendement, de façon à mettre en vue les bonnes continuités de travail d'une part, les discontinuités d'autre part.

Ces graphiques éloquents placés sous les yeux des contremaîtres et ouvriers, et convenablement expliqués, sont de précieux moyens d'appréciation et de correction de la valeur du personnel; on base souvent sur eux un système de primes variables suivant les résultats obtenus.

Nous les avons déjà vu employer avec succès dans plusieurs industries, en plus des quelques calculs de rendement que l'on pratique en général partout.

Dans le cas des très grosses installations, cette première catégorie de buts à remplir par le laboratoire est, en dehors de ces derniers graphiques dans lesquels le laboratoire central doit intervenir, l'apanage des laboratoires annexes; ce qui suit, au contraire,

revient presque exclusivement au laboratoire central et, naturellement, rentre aussi dans les fonctions du laboratoire unique.

2° Rôle intermittent en cas d'accidents ou de changements dans la fabrication :

a) Fabrications nouvelles. — Étude des pièces à réaliser; directives à donner d'accord avec le chef de fabrication, pour leurs préparation et transformations dans les différents ateliers; genres d'essais à pratiquer; insertions de toutes ces données nouvelles dans le contrôle courant.

b) Changement dans certaines fabrications. — Il est parfois nécessaire d'envisager des modifications dans certaines fabrications : par exemple, dans le cas où le ravitaillement en certaines matières premières devient difficile ou insuffisant, lorsque certains cours s'élèvent par trop, ou quand la concurrence devient trop active. Le laboratoire est alors amené à envisager la recherche de produits de remplacement, afin d'adapter la fabrication aux circonstances du moment; c'est là une étude toujours délicate, souvent compliquée du fait de l'urgence du problème posé.

c) Accidents de fabrication. — En cas d'insuccès, recherche des causes et des remèdes; c'est là un rôle fondamental, sur lequel il est inutile de s'étendre davantage.

3° Réalisation de progrès :

Étude des produits de la fabrication en vue des emplois qu'ils ont à remplir; étude parallèle des produits de la concurrence; recherche des matières premières, traitements et assemblages optima, les prix de revient étant déterminés parallèlement par les bureaux d'études;

Étude des procédés de fabrication, en vue d'améliorations possibles; recherche du rendement maximum; taylorisation;

Étude d'une utilisation et d'une récupération des sous-produits lorsque cela n'est pas encore réalisé;

Recherches scientifiques nouvelles pour éclaircir les points restés obscurs dans les études précédentes;

Étude technique des brevets dont l'achat est proposé à la direction.

En cas de succès dans ces travaux, rédaction, s'il y a lieu, de nouveaux cahiers des charges ou modifications aux conditions antérieures de réception.

4° Contrôle d'appareils d'ateliers; fabrications au laboratoire :

Nous devons, ici, insister sur la nécessité du contrôle périodique de certains appareils d'atelier : pyromètres, jauges, calibres, presses, etc.; c'est le laboratoire qui doit effectuer ces contrôles, soit dans ses salles d'essais, soit sur place aux ateliers.

La vérification périodique des pyromètres thermo-électriques, en particulier, est une opération délicate et absolument indispensable. De nombreux accidents de traitement viennent de l'absence de ce contrôle ou de son exécution défectueuse.

La méthode souvent utilisée du potentiomètre ne donne, le plus souvent, qu'une vérification illusoire, parce que n'éliminant pas l'altération chimique des fils du couple par les gaz du four.

Il est nécessaire de prévoir, dans la salle d'essais physiques du laboratoire, une installation de contrôle spécialement adaptée.

Ensuite, fabrication à l'atelier de précision dont nous démontrerons tout à l'heure l'utilité dans le laboratoire, de certaines pièces, règles de réglage, etc., contrôle de ces instruments.

Parfois enfin, traitements spéciaux complexes, par exemple ceux des outils à coupe rapide, dont les difficultés de traitement sont bien connues, des aciers rapides au cobalt de récente création (ces traitements d'outils peuvent se faire aux laboratoires divisionnaires des grandes installations), etc., et également élaboration de certains produits pour soudures délicates.

5° Documentation :

Tenue à jour de la bibliothèque, abonnements aux périodiques français et étrangers; renseignements sur les procédés nouveaux, les découvertes récentes, en vue de leurs applications possibles; tenue à jour des dossiers et fiches relatifs aux essais et travaux divers effectués au laboratoire.

6° INSTRUCTION DU PERSONNEL :

Dans le cas du laboratoire central, formation du personnel des laboratoires divisionnaires.

Dans le cas général, formation de certains ouvriers spécialistes : pour le réglage de la température des fours, les trempes spéciales, les contrôles de cémentation, etc.

Stages de chefs de service et de contremaîtres pour les initier aux difficultés multiples de leur fabrication.

Si ce rôle très important est bien rempli, si l'instructeur a la valeur et le doigté nécessaires, il n'est pas possible de ne pas « apprivoiser » les empiristes les plus récalcitrants. Ces stages permettent d'insinuer insensiblement et tout naturellement, de par la force des choses, les premiers éléments de méthode scientifique parmi le personnel à l'instruction.

Enfin, le laboratoire, aussi bien par son personnel que par son matériel, est l'une des bases des organisations d'apprentissage.

§ 2. ORGANISATION MATÉRIELLE DU LABORATOIRE. — Nous avons dit, rappelons-le, que nous adoptions le cas d'un vaste laboratoire unique, quitte à le réduire si l'on envisage une installation plus modeste.

Ensemble du bâtiment. — Lorsqu'on monte un laboratoire dans une usine, on utilise, la plupart du temps, des locaux existants.

Nous allons indiquer cependant tous les desiderata que l'on peut formuler dans la construction d'un bâtiment neuf. Cela peut être utile, même dans le premier cas, lorsqu'on hésite entre plusieurs emplacements.

Nous allons, tout d'abord, nous efforcer d'avoir de l'espace, de l'air, de la lumière et l'absence de trépidations.

L'idéal est un bâtiment un peu à l'écart, largement conçu quant aux dimensions et prenant celles-ci plus en surface qu'en hauteur, les vibrations s'accentuant d'étage en étage. Notons en passant que l'orientation n'est pas indifférente.

Construisons donc simplement deux étages, l'un à demi-enterré où nous mettons les parties ayant le moins besoin d'air et de lumière, l'autre à 1 m 50 environ au-dessus du niveau du sol, et suffisamment haut de plafond. Murs assez massifs pour bien stabiliser l'ensemble, d'autant que les ouvertures, portes et fenêtres,

doivent être larges, les portes pour la bonne circulation des grosses pièces, longues barres que l'on peut avoir à examiner; les fenêtres pour laisser entrer à flots l'air et la lumière. Un escalier intérieur, large également.

Un moyen d'accès direct de l'extérieur à l'étage inférieur, rampe inclinée par exemple; des circulations bien conçues pour le chauffage et les fluides nécessaires : eau, gaz, électricité, air comprimé; et ne pas craindre de faire de la place.

En général, on voit toujours trop petit dans ce genre de projets : on a très souvent, au cours de travaux de laboratoire, des montages plus ou moins compliqués à effectuer, avec des moyens de fortune parfois très encombrants.

Il faut être à l'aise, ne pas être gêné par ses voisins et ne pas leur rendre la pareille.

Passons maintenant en revue les différentes parties du laboratoire, qui sont :

Direction, secrétariat, bibliothèque;
Magasin de réception des produits, magasins de réserves;
Atelier de préparation des éprouvettes;
Essais chimiques;
Essais physiques et physico-chimiques;
Essais mécaniques;
Fonderie et traitements thermiques.

Direction. Secrétariat. Bibliothèque. — *Le bureau du chef de laboratoire, le secrétariat, la bibliothèque* n'ont rien à présenter de particulier, sauf en ce qui concerne le classement des renseignements et des essais.

Le service de renseignements, composé de dossiers convenablement classés, doit porter sur le matériel de l'usine et du laboratoire (caractéristiques des machines), sur le matériel similaire existant ou le matériel pouvant être utile à l'avenir (catalogues de constructeurs), sur les produits fabriqués et ceux de la concurrence.

Il doit comprendre aussi des séries de fiches bibliographiques sur les modes de fabrication, les méthodes d'essais, les propriétés et emplois des alliages, les traitements de toutes sortes; c'est là, évidemment, une documentation longue à établir et qu'il faut tenir soigneusement à jour, mais elle économise bien du temps

par la suite; non seulement en permettant aux opérateurs de trouver sans retard tout ce qui existe sur une question posée, mais aussi en évitant la réexécution d'un travail déjà effectué, dont l'existence aurait pu passer inaperçue au milieu des très nombreuses publications scientifiques. Disons, d'ailleurs, que l'établissement de cette documentation peut être simplifié en ayant recours à des laboratoires scientifiques possédant déjà de tels rassemblements bibliographiques.

Le mode de classement des essais effectués au laboratoire est en dépendance étroite du genre de fabrication.

Il doit, en général, comporter des répertoires relatifs aux pièces, aux alliages, aux machines ayant donné lieu à des essais.

Le classement par fiches est particulièrement indiqué.

Le numérotage de ces répertoires et fiches renvoie aux dossiers d'essais, et l'on doit apporter le plus grand soin, d'une part au mode de numérotage, d'autre part à la constitution de ces dossiers.

Le genre de numérotage doit être longuement étudié à l'avance et comporter des suites de signes, lettres ou chiffres, indiquant le genre d'essais (essais nouveaux ou essais de contrôle), les différents services que la recherche intéresse, la catégorie d'alliages ou de pièces expérimentés.

Le choix, répétons-le, dépend des fabrications que l'on assure. Ce numérotage doit être reporté sur les répertoires et fiches, sur tous les éléments du dossier et sur les éprouvettes et pièces essayées.

Quant aux dossiers, ils doivent comprendre essentiellement :

— les documents ayant décidé de la recherche à effectuer;

— le programme spécial de la recherche et tout son développement détaillé, la bibliographie s'il y a lieu;

— les documents d'essais : résultats numériques, observations, diagrammes, photographies, micrographies, etc.;

— les conclusions et conséquences pratiques de la recherche.

Signalons en terminant que ce centre de documentation, la bibliothèque, doit être en même temps la salle de travail du personnel.

L'ameublement doit en être prévu en conséquence, et l'approvisionnement en ouvrages techniques, revues et périodiques français et étrangers, doit être suffisamment abondant, malgré la dépense annuelle assez considérable nécessaire à cet effet.

Magasin de réception et réserves. — C'est là qu'arrivent les pièces, prélèvements, échantillons, envoyés par les différents services.

Les borderaux joints sont portés au chef du laboratoire qui donne les indications nécessaires pour la préparation des dossiers et fiches d'essais; dès constitution de ces derniers, les produits sont matriculés et transmis aux parties intéressées.

Lorsque le travail est terminé, tous les morceaux inutilisés, les éprouvettes essayées, correspondant à un même dossier sont rassemblés et rangés par même catégorie et dans l'ordre des matricules, de façon qu'on soit en état de les retrouver rapidement si besoin est.

Ce classement se fait dans des casiers assemblés verticalement et de grandes dimensions; des tableaux placés sur chaque groupe de cases renvoient aux répertoires. Les clichés sur verre doivent, eux, être rangés à part, dans des classeurs, eux aussi soigneusement numérotés.

Ce magasin doit être également pourvu des matières premières couramment utilisées dans l'usine et de tous les produits nécessaires aux essais : métaux purs et commerciaux sous différentes formes (ronds de plusieurs diamètres, tôles, etc.), bois, toiles; et également des accessoires courants : fil électrique, interrupteurs, tubes de caoutchouc, lampes, fils de résistance pour fours électriques, etc.

Le chef du laboratoire doit constituer ainsi des réserves suffisantes qui permettent aux expérimentateurs de tout avoir sous la main pour les travaux courants, et évitent, dans la mesure du possible, les déplacements à l'intérieur de l'usine et les commandes à l'extérieur, entraînant des pertes de temps, des discontinuités dans le travail.

On doit, enfin, avoir des rechanges suffisants pour les machines d'essais : billes pour les essais de dureté, couteaux pour les moutons de choc, lampes spéciales pour micrographie, gaines de pyromètres thermo-électriques ou à résistance, creusets, moufles, soles de fours, etc.

Atelier de préparation des éprouvettes et installations diverses. — Il est extrêmement commode de diposer, au laboratoire même, d'un petit atelier capable de la préparation des éprouvettes d'essai.

Dans certaines usines, on confie ce travail aux ateliers de fabri-

cation, ce qui, à notre avis, n'est pas à recommander; on sait, en effet, que cette préparation des éprouvettes est délicate : les lieux et les sens de prélèvement ne sont pas indifférents, et les repérages connexes doivent être faits avec soin.

Souvent des précautions de détail doivent être prises : pour les prélèvements en vue d'analyse chimique, par exemple, il faut parfois éliminer le métal de surface; certains usinages d'éprouvettes nécessitent une technique bien définie; les échauffements, un travail trop brutal entraînant de l'écrouissage doivent être évités.

Sans parler de la gêne fréquente que ces travaux supplémentaires, hors série, irréguliers, apportent pour le rendement normal et continu des ateliers, il vaut mieux que le chef de laboratoire ait cette fabrication sous la main et qu'un ou plusieurs bons mécaniciens y soient spécialisés; une erreur ou une malfaçon dans une préparation d'éprouvettes entraîne toujours un retard dans l'exécution des essais; elle peut avoir des répercussions plus graves si l'anomalie des résultats n'est pas évidente; il ne faut donc pas hésiter devant cette dépense supplémentaire de création d'un atelier et devant l'affectation du personnel convenable.

Cet atelier doit, naturellement, comporter le matériel nécessaire à l'exécution des éprouvettes et des pièces diverses demandées par le laboratoire : tour dégrossisseur et tour de haute précision, fraiseuse, machine à rectifier, perceuse, scie, meules, sableuse, mouton, broyeurs, tamis, petit outillage.

Un établi et les instruments nécessaires pour le travail du bois sont aussi fort utiles.

En dehors de la préparation des éprouvettes, cet atelier doit en effet pouvoir suffire à la réparation des machines d'essais du laboratoire et aussi à l'exécution d'appareils ou accessoires divers.

Dans certaines usines, il constitue même l'atelier de précision auquel on confie les petits travaux délicats de réparation, la fabrication des calibres, jauges, etc.

Notons, en passant, que cet atelier ne doit pas être placé sur le même plancher que celui de salles (comme celle des balances ou celle des essais physiques ou physico-chimiques) exigeant l'absence de trépidations.

Enfin, il est souvent très pratique de placer sous la dépendance

de cet atelier et de son personnel certains accessoires du laboratoire que nous énumérons ci-après :

La production d'air comprimé (lorsqu'on n'en dispose pas par ailleurs dans l'usine) à l'aide d'un moteur et d'un compresseur; cet air est employé en chimie (trompes, fours), pour le fonctionnement de certaines machines d'essais et des fours à température élevée, pour les séchages micrographiques;

Les transformations de courant électrique, soit que l'on soit alimenté en continu et que l'alternatif soit nécessaire, pour des essais magnétiques par exemple, soit que l'on soit obligé de réaliser de hautes tensions (fours à haute fréquence, radiométallographie), soit que ce soit l'inverse qui ait lieu (cas des installations en montagne);

La production des gaz carburés ou de pétrole sous pression pour le chauffage des fours, lorsqu'on ne dispose pas de gaz combustible provenant de l'extérieur ou du reste de l'usine; dans ce cas, en effet, le chauffage par alcool employé parfois pour les petits travaux de chimie ne suffit pas, le chauffage par le courant électrique coûte cher sauf dans des cas spéciaux; il est donc commode d'installer un des nombreux types de carburation de gaz existant maintenant sur le marché et dont certains fonctionnent de façon tout à fait satisfaisante et relativement économique;

La fabrication d'eau distillée; si nécessaire la réalisation d'une circulation d'eau; parfois la production du vide;

Enfin, la *recharge des accumulateurs*, le chauffage des locaux du laboratoire.

Tout cela peut être disposé dans l'atelier même, ou, de préférence, dans des pièces très voisines.

Il arrive souvent que l'on place le poste de secours dans le bâtiment même du laboratoire.

Salles d'essais chimiques. — Dans notre importante installation, nous devons prévoir :

— une vaste salle pour les travaux chimiques courants proprement dits;

— parfois, une salle plus petite, particulièrement bien ventilée, réservée aux réactions dégageant des quantités importantes de gaz et vapeurs;

— une salle spéciale réservée aux essais électrolytiques;

— une salle spéciale de balances;

— une pièce comportant de nombreuses étagères sur lesquelles on placera les réserves de produits courants et de matériel, verrerie, etc;

— un réduit pour acides à l'extérieur du bâtiment.

La grande salle de chimie sera meublée à l'aide de tables centrales avec éviers aux extrémités, et, sur le pourtour, de tables adossées avec hottes et sorbonnes; les appareils importants : fours, étuves, bains de sable, seront placés sur ce pourtour.

Cette salle, haute de plafond, doit être particulièrement bien éclairée et aérée; le tirage et la ventilation doivent faire l'objet d'une étude spéciale; les dimensions des sorbonnes et hottes, l'installation de la cheminée et éventuellement d'un ventilateur, ne sont pas indifférentes et doivent être établies avec soin, ceci dans l'intérêt du personnel et du matériel.

Il ne faut pas non plus négliger une étude préalable des circulations de gaz, air comprimé, eau, électricité, vide, s'il y a lieu; les tuyauteries correspondantes, courant parallèlement sous les tables, bien dégagées les unes des autres, de façon que l'on puisse réaliser facilement des dérivations nouvelles, peuvent avantageusement être peintes en couleurs différentes suivant le fluide qui les parcourt, ceci pour éviter des erreurs. Notons que suivant la nature du combustible utilisé, les brûleurs changent de dimensions et de disposition.

Un coin de la salle doit être réservé aux expériences de corrosion.

La petite salle de chimie, pour réactions à dégagements gazeux abondants, comportera une organisation analogue avec renforcement de l'aération.

La salle d'électrolyse ne doit servir qu'à cet usage, être un peu à l'écart et à l'abri des poussières; les batteries sont alignées dans une hotte ou mieux une sorbonne allongée; on installe maintenant des montages multiples avec tableaux de distribution permettant la multiplicité des essais et rendant très faible le temps de présence nécessaire pour les manipulateurs.

Les balances doivent, elles aussi, être placées dans une petite salle à part, à l'abri des poussières et des variations brusques de température, préjudiciables à la précision des pesées : pas de poêle ou de radiateur dans cette pièce qui doit même être exposée au nord, à l'abri des rayons solaires.

Les vibrations sont à éviter dans toute la mesure du possible; pour cela, les tables seront suffisamment stables et massives (en ardoise, par exemple) et devront être isolées des murs.

Si cela est nécessaire, on place sous les pieds de la table ou sous les supports des balances, des amortisseurs : rondelles de caoutchouc ou de feutre comprimé, ou encore ressorts à boudin noyés dans un feutrage en poil de chameau.

Si cela ne suffit pas, on pourra essayer les procédés que nous indiquerons plus loin au chapitre des essais physiques et physico-chimiques. C'est dans cette salle de balances que seront exécutés les essais de densité des alliages et des bois.

Au sujet des réserves de produits, indiquons une sage précaution : placer les matières inflammables dans un coin isolé, bien abrité de toutes projections possibles, situé près d'une fenêtre facilement accessible de l'extérieur, afin que l'on puisse évacuer rapidement ces produits dans le cas d'une explosion ou d'un début d'incendie.

Les bonbonnes et réserves d'acides doivent être emmagasinées dans un réduit spécial, à l'extérieur du bâtiment, soit sur une terrasse, soit dans une cour; ce réduit étant bien aéré et construit de préférence en ciment, sans charpentes métalliques visibles.

Enfin, pour en terminer avec la partie chimie, n'oublions pas que, en dehors des essais des métaux ou alliages, nous pouvons avoir à effectuer des essais chimiques autres : contrôle de la combustion par les gaz des fours, huiles, etc...

Salles d'essais physiques et physico-chimiques. — Voyons d'abord les genres d'essais que nous pouvons avoir à effectuer ici :

A. *Essais physiques.* — Étude des points de transformation, détermination des diagrammes, mesures de caractéristiques physiques par fusibilité et calorimétrie (pyromètres, galvanomètre enregistreur Coste, galvanomètre double Saladin-Le Châtelier-Broniewsky) par dilatométrie (comparateurs, analyseur thermique Chèvenard, dilatomètre différentiel Chèvenard), par résistance électrique (pont de Thomson), par magnétisme (fluxmètre, perméamètre, hystérésimètre, mesure des pertes), par thermoélectricité, conductibilité thermique, sonorité, par radiométallographie; en ce qui concerne cette dernière, les recherches cristallographiques

et les radiographies ordinaires, basées sur des principes entièrement distincts, utilisent des appareillages bien différents.

B. *Essais physico-chimiques.* — Micrographie et macrographie des alliages, nécessitant des installations de polissage, d'attaques chimiques, d'examen (loupes binoculaires, bancs Le Châtelier), de photographie (appareils divers, chambre noire).

Nous placerons tous ces appareils dans une ou plusieurs salles bien éclairées.

Pour la plupart de ces essais, les vibrations sont funestes; on devra donc réaliser un sol assez massif et placer les appareils sur des tables individuelles bien stables, isolées des murs; ne jamais mettre deux appareils sur la même table, car la manipulation, en vue d'une préparation d'essais, sur l'une, empêcherait tout travail sur l'autre; enfin, il sera très fréquemment nécessaire de placer des amortisseurs de vibrations.

Il est facile de déceler en un point les vibrations même faibles en posant en cet endroit une coupelle de porcelaine contenant du mercure; les vibrations engendrent sur la surface liquide des ondes bien visibles.

Pour combattre ces vibrations, il ne faut pas oublier que ces mouvements ne sont pas forcément verticaux et que des amortisseurs verticaux n'arrêteront rien des vibrations horizontales.

Si l'interposition de rondelles de caoutchouc ou de feutre comprimé, ou encore de ressorts à boudins noyés dans un feutrage en poil de chameau, ne suffisent pas, on sera obligé de recourir à des dispositifs plus complexes : on peut suspendre par quatre coins, soit l'appareil lui-même, soit la tablette sur laquelle repose l'appareil, à des potences fixées aux tables ou scellées dans le sol. Des suspensions aux fermes métalliques du toit peuvent être réalisées soit en fils d'acier avec interposition de ressorts convenablement calculés, du genre de ceux utilisés pour soupapes de gros moteurs d'avions, soit en gros cordons de caoutchouc, soit en cordes de chanvre un peu élastiques, avec ou sans interposition de ressorts.

Ces suspensions seront verticales, ou mieux plus ou moins obliques suivant la nature des vibrations; il est naturellement indispendable que ces suspensions soient, sur toute leur longueur, exemptes de tout contact extérieur (par exemple dans la traversée d'un plafond en cas d'attache aux fermes du toit).

Enfin, si ces dispositifs se révèlent encore insuffisants, on peut fixer sous l'appareil des palettes faisant corps avec lui ; ces palettes sont des tôles croisillonnées, disposées verticalement ; on les fait plonger dans des bacs à huile lourde posés sur le plancher de la salle.

Ces bacs doivent être assez grands pour que les vibrations aient le temps de s'amortir entre les palettes et les parois des bacs ; à noter qu'avec ce dispositif supplémentaire, les suspensions courtes sont préférables.

Ces amortisseurs à huile, faciles à réaliser, constituent le dernier recours, dans l'état actuel du problème ; ils sont d'une très grande efficacité ; il arrive cependant que l'on soit obligé d'attendre dans certaines usines les heures de suspension de travail pour réaliser les essais extra-sensibles, par exemple les microphotographies à très fort grossissement.

En dehors de la ou des salles destinées aux appareils proprement dits, il sera nécessaire de prévoir une chambre noire assez vaste pour le développement des clichés micrographiques, macrographiques et radiographiques, et des plaques impressionnées sur les appareils enregistreurs.

Il faudra installer également en vue des essais micrographiques : un petit réduit à l'abri des poussières dans lequel se trouveront les machines à polir à alumine, une petite salle d'attaque, bien éclairée, avec table de chimie, évier, eau, gaz et air comprimé pour le séchage des échantillons polis et attaqués (on effectue dans certains cas des attaques acides à chaud dont les vapeurs, nocives pour les appareils, doivent être, en effet, isolées).

N'oublions pas, pour les examens par rayons X, les protections convenables par cloisons de plomb.

Ces salles d'essais physiques serviront également à deux sortes de contrôle : les vérifications des calibres et jauges divers employés dans l'usine et celle des pyromètres thermo-électriques des appareils de traitement.

Ces contrôles doivent être faits périodiquement et donner lieu à des fiches de vérification ou à un poinçonnage renouvelé des appareils eux-mêmes.

Salle des essais mécaniques. — Tout d'abord, pour les essais des métaux et alliages, nous aurons besoin des trois machines essentielles de traction, choc et dureté à la bille.

Pour la traction, si les expériences avec éprouvettes réduites de la Commission permanente de Standardisation suffisent, on pourra s'arrêter à une machine de 15 t de force maximum.

Si l'on doit adopter les éprouvettes normales, il faut une machine de 30 t.

Si, en dehors de la traction, on est appelé à exécuter des essais de flexion sur barres, longerons, charpentes, etc., ainsi que des essais de compression, cisaillage, pliage, on devra envisager l'emploi d'une machine « universelle » de 50 ou même de 100 t, suivant les efforts de flexion demandés.

On pourra également exécuter avec cette machine des essais d'hélices, roues, trains d'atterrissage, grâce à des dispositifs d'adaptation convenables.

Souvent, cette grosse machine de traction ne sera pas assez sensible pour les expériences, sous efforts faibles, sur cordes à piano, tendeurs, etc.; alors, un dynamomètre de 1 ou 2 t sera nécessaire.

Suivant les genres de fabrication et le développement donné au laboratoire, d'autres modes d'essais intéressants pourront exiger des machines d'emboutissage, usure, torsion, — chocs, pliages et flexions répétés — des tensiomètres, etc...

Des machines d'équilibrage peuvent également être à l'ordre du jour.

Un certain nombre des machines ci-dessus énumérées réclament des contrôles et tarages périodiques: quelques-unes doivent être équipées en vue des importantes déterminations des caractéristiques à chaud ou à froid.

L'installation, en elle-même, n'a rien de spécial, il faut s'arranger pour que les secousses produites par la rupture sur machines de traction, moutons de choc, etc... ne puissent gêner les essais sensibles effectués dans les autres salles du laboratoire.

Salle de fonderie et traitements thermiques. — Cette salle comprendra :

1° Pour la fonderie, le matériel nécessaire à l'élaboration d'alliages et à l'obtention de lingots ou éprouvettes d'essais : fours à creusets, soufflés ou non, petits moules et lingotières, éventuellement, pour les températures très élevées (aciers spéciaux), fours à haute fréquence; fours à gaz (à soles simples et double, à moufles,

à tubes, à bains de sels ou de plomb, à cémenter) ou — lorsque le courant est bon marché — fours électriques. Citons comme accessoires les bacs de trempe, du matériel de forgeage s'il y a lieu, et, naturellement des pyromètres, installés à poste fixe et des régulateurs automatiques.

On peut même effectuer des montages de pyromètres multiples, possédant les mêmes caractéristiques que ceux en service aux ateliers et facilitant le contrôle périodique de ces derniers; nous avons vu que c'est là que seront vérifiés les télescopes Féry.

Des possibilités de fusions ou chauffages dans le vide ou dans des atmosphères diverses doivent être envisagées.

Enfin, un poste de soudure peut être utile.

Nous avons encore ici un traitement courant de fabrication qui peut prendre place dans notre laboratoire : celui des outils à coupe rapide.

Les difficultés qu'il présente sont grandes; elles ont été quelque peu réduites grâce à la récente introduction de cobalt dans ces aciers complexes, mais elles restent encore bien appréciables.

L'aménagement à cette fin, d'un coin de la salle des traitements, avec four à deux soles, bains de trempe et de revenu, meules, et l'affectation d'un manipulateur consciencieux, sous le contrôle du chef de laboratoire, économisent souvent bien des déboires et des dépenses imprévues.

Cette salle de fonderie et traitement thermique devra être largement aérée, avec ventilateurs si besoin est et dispositifs d'évacuation des gaz brûlés.

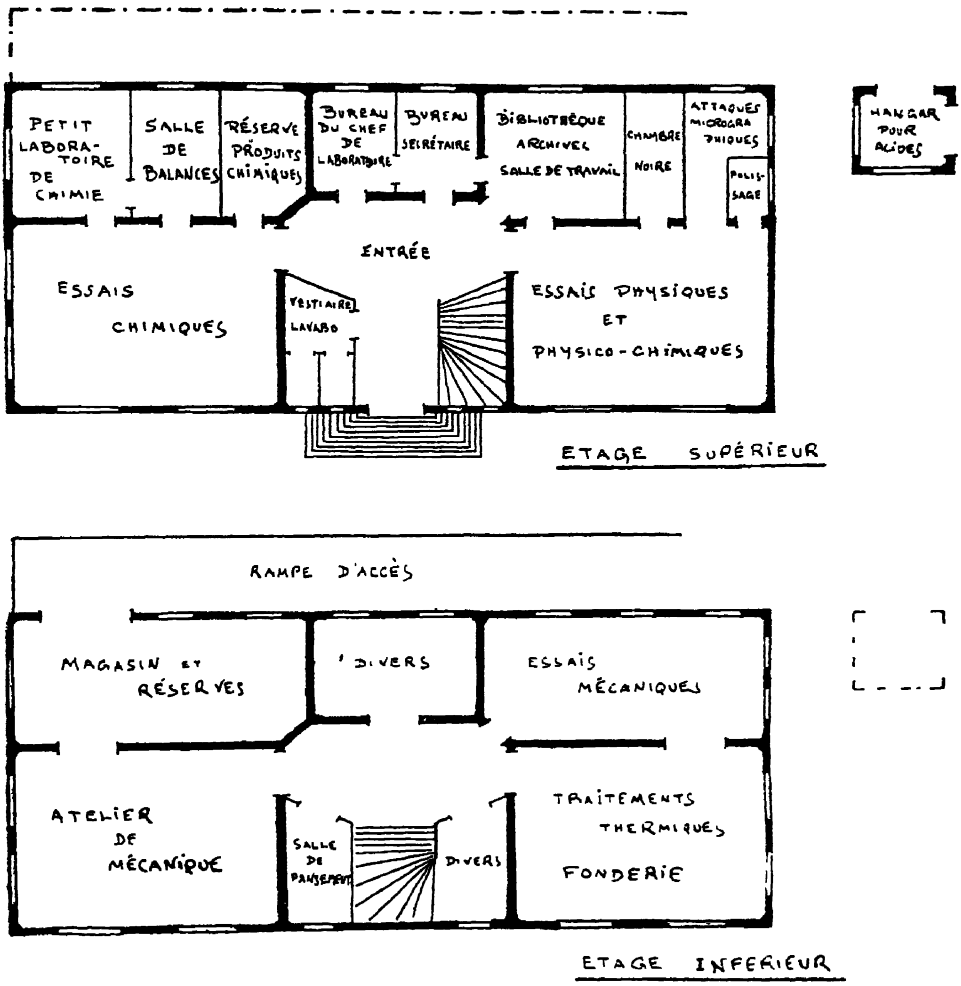
La figure représente un plan de laboratoire-type, tel que nous venons de le décrire.

§ 3. Personnel du laboratoire. — Le personnel, cela va sans dire, devra être particulièrement bien choisi, les manipulateurs eux-mêmes doivent être pénétrés de ces idées d'ordre et de précision qui sont à la base de la méthode scientifique; l'esprit d'initiative ne doit pas, dans une juste mesure s'entend, leur faire défaut.

Enfin, il faut qu'ils soient tous bien convaincus de cette nécessité de la mesure, fondement essentiel de la recherche, et de la relativité d'approximation à maintenir d'une mesure à une autre.

Ces manipulateurs devront même s'efforcer de faire rayonner

un peu de cet esprit scientifique dans le reste de l'usine, soit au cours de leurs incursions dans les ateliers de fabrication, soit pen-



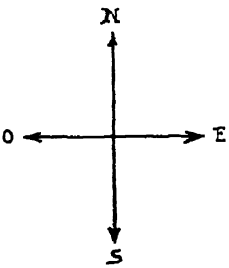
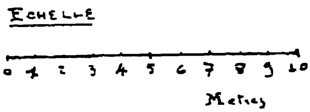


Fig. 131.

Projet de laboratoire de métallurgie et construction mécanique.



dant ces petits stages d'instruction que nous avons insérés parmi les rôles du laboratoire.

Ces qualités à exiger du personnel devront être particulièrement vives chez les expérimentateurs des salles de physique, physico-chimie, mécanique, fonderie et traitement thermique.

Les affectations du personnel, dans l'installation projetée (fig. 131) pourraient être les suivantes :

— un chef de laboratoire;

— une secrétaire chargée de la correspondance, de la bibliothèque, et de la préparation des fiches et dossiers;

— au magasin et à l'atelier des machines-outils et annexes, un mécanicien et un apprenti;

— pour la chimie, un chef de section, un ou deux manipulateurs;

— pour les autres départements, un chef de section, remplissant en plus le rôle d'adjoint au chef de laboratoire et chargé de la documentation, avec, sous ses ordres, deux ou trois manipulateurs et une femme chargée des polissages micrographiques et des travaux photographiques, et également du lavage du matériel de chimie.

Nous arrivons à une dizaine de personnes. Nous avons, rappelons-le, étudié le cas d'une installation importante, quitte à la réduire si nécessaire.

Nous pourrons, par exemple, envisager pour un petit laboratoire : un chef de laboratoire exécutant les essais autres que ceux de chimie, un chimiste chargé également des travaux de chambre noire, un mécanicien s'occupant de la préparation mécanique des éprouvettes et de l'exécution des polissages micrographiques et surveillant les traitements thermiques, soit trois personnes qui permettent déjà un rendement non négligeable.

Rappelons bien, en terminant, la nécessité d'une bonne organisation initiale de la liaison entre les différents services.

CHAPITRE XIV

NORMALISATION

---

§ 1. But et organisation de la normalisation.

I. — But de la normalisation.

Le but a été nettement précisé par la *Commission permanente de Standardisation française* (1), à savoir :

« Unification des produits servant à un même usage;
« Limitation du nombre des différents types;
« Élévation du niveau des qualités demandées.

II. — Organisation de la normalisation en France.

L'Instruction du 26 novembre 1928 du ministre du Commerce définit, comme suit, cette normalisation

Organismes chargés, en France, de la normalisation — Les organismes qui ont un rôle à jouer, en France, dans la normalisation, sont les suivants :

a) *La Commission permanente de Standardisation* (*C. P. S.*), constituée au ministère du Commerce, comprenant des représentants des différents départements ministériels et des personnalités du monde des sciences, du commerce et de l'industrie;

b) *L'association française de normalisation* (*A. F. Nor.*), Société privée groupant toutes les collectivités et toutes les personnalités

---

(1) Au vocable « standardisation », on a substitué souvent ceux d'« unification » et de « normalisation ». C'est de préférence ce dernier vocable que nous adopterons.

s'intéressant au développement de la puissance économique du pays et à l'amélioration des conditions de la vie en France.

c) *Les Bureaux de Normalisation* (*B. N.*) des syndicats ou unions de syndicats généralement créés par les producteurs des objets à normaliser et travaillant en contact étroit avec les usagers.

Rôle des organismes. — *a*) La Commission permanente de Standardisation a un rôle de *direction*, *d'arbitrage* et *d'homologation.*

Elle fixe les directives d'ordre général et scientifique sur lesquelles doivent être établies les normalisations. Elle peut signaler celles de ces dernières qu'il lui paraîtrait utile d'entreprendre.

Elle tranche tous cas litigieux, délicats ou hors de la compétence des bureaux de normalisation, qui lui sont soumis par l'A. F. Nor.

Elle confère aux normes établies la sanction officielle.

Elle peut, exceptionnellement, établir des fascicules de normalisation, notamment, soit pour les questions d'un caractère général, soit pour celles intéressant directement l'État.

b) L'Association française de Normalisation *centralise* tout ce qui concerne la normalisation en France.

Elle a un rôle de *propagande*, de *diffusion* et d'*information.*

Elle *groupe* les organismes français s'occupant de normalisation et leur sert d'*intermédiaire* vis-à-vis de la Commission permanente de Standardisation, des Pouvoirs publics et, en principe, des organismes similaires étrangers. De plus, elle les *représente* aux réunions internationales.

Elle s'interdit d'élaborer elle-même des normes et se borne à en *recommander* ou à en *provoquer la création.* Elle *vérifie* celles qu'ont établies les bureaux de normalisation et les soumet pour homologation à la C. P. S.

Elle doit :

Aider et *guider* les bureaux de normalisation, notamment en mettant à leur disposition une *documentation* complète qu'il lui appartiendra de réunir;

S'efforcer de *diffuser* et de *faire appliquer* les normes adoptées;

Constituer une *bibliothèque* où le public pourra consulter sa documentation et un *bureau de vente* de tous les fascicules de normalisation.

Vis-à-vis de la C. P. S., elle joue, en outre du rôle d'intermédiaire indiqué plus haut, celui d'un secrétariat.

c) Les Bureaux de Normalisation sont les agents techniques d'élaboration des normes. Ils jouissent d'une large initiative dans le cadre des directives générales émanant de la C. P. S. et des indications données ou transmises par l'A. F. Nor. avec laquelle ils se tiennent en accord pendant l'exécution de leurs travaux.

Ils procèdent :

1° S'il y a lieu, à l'établissement d'un programme général des normes à établir, classées par ordre d'urgence;

2° A la confection détaillée des normes elles-mêmes et des fascicules de normalisation.

A cet effet, munis de renseignements recueillis dans l'industrie même qui les a créés, ils font toutes études, enquêtes publiques, établissements d'avant-projets nécessaires, jusqu'à l'adoption d'un projet définitif.

Les correspondances échangés avec le Bureaux de Normalisation étrangers sont, en principe, transmises par l'A. F. Nor. et le Bureau international.

De même, les Bureaux de Normalisation ne communiquent entre eux, avec la C. P. S. et avec les différents départements ministériels que par l'intermédiaire de l'A. F. Nor.

III. — Confection d'une norme.

Les principes généraux étant posés, les directives reçues et toutes études préliminaires terminées, le Bureau de Normalisation intéressé établit, en accord complet avec la C. P. S. et l'A. F. Nor., un avant-projet qui est soumis à l'enquête publique.

La liste des collectivités et des personnalités à consulter est établie avec soin en tenant compte des directives données par la C. P. S. Elle comprendra indépendamment des représentants des producteurs, des commerçants et des consommateurs, les différents départements ministériels.

L'enquête publique peut conduire à un ou plusieurs remaniements également soumis à l'enquête, étudiés en conférence, etc., de manière à tenir compte des avis exprimés et à concilier les divers points de vue.

La C. P. S. décide en dernier ressort.

Elle juge s'il convient :

1° D'accepter le projet sans réserve;

2° De le renvoyer pour nouvelle étude;

3° De ne l'appliquer qu'au seul usage d'objets de consommation courante sous réserve de l'élaboration de normes complémentaires pour ceux d'un emploi plus spécial ou devant présenter des qualités particulières.

Les normes établies sont revisées quand la nécessité en est reconnue.

§ 2. Les normes ou standards en métallurgie. — Il faut distinguer les *standards de qualité* et les *standards de forme.*

Les standards de qualité sont exprimés dans les Cahiers des Charges.

Les standards de forme sont définis par des tableaux, établissant l'unification et la limitation des formes.

A. — Standards de qualité.

Ils exigent :

a) La détermination des caractéristiques des matériaux;

b) Le contrôle de ces qualités.

a) Détermination des caractéristiques des matériaux.

Ceux-ci tout en étant des produits de qualité irréprochable, peuvent être classés en matériaux de *première série* (spécification A), répondant à une fabrication sélectionnée (c'est le cas des matériaux entrant dans la construction du matériel aéronautique) et matériaux de *deuxième série* (spécification B) répondant aux conditions normales de construction, possédant toutes les qualités requises sans recherche de qualités particulières non indispensables pour une construction courante. Les matériaux de cette deuxième série ne doivent pas être l'objet d'une dépréciation.

La nécessité, pour eux, de répondre à des conditions nettement spécifiées les empêche de tomber dans le discrédit vis-à-vis des matériaux de première série.

L'élévation de leur qualité est suffisante pour satisfaire les besoins auxquels ils correspondent sans qu'on puisse les accuser d'être des produits de deuxième zone.

L'obligation de satisfaire aux facteurs « sécurité et économie détermine leurs qualités.

b) Contrôle des qualités des matériaux.

La normalisation du contrôle constitue une des préoccupations les plus importantes de l'ingénieur chargé de vérifier les qualités d'un matériau de construction et d'exprimer la valeur de ces qualités.

Cette normalisation suppose :

1° Une définition précise et standard des caractéristiques à obtenir, soit *quantitativement*, soit *qualitativement*, soit les deux à la fois;

2° Une spécification « standard » des méthodes, machines ou appareils mettant en évidence ces caractéristiques;

3° Une définition « standard » des éprouvettes soumises aux essais;

4° L'adoption d'une terminologie standard.

Nous allons examiner successivement ces différents facteurs.

I. — Définition standard quantitative et qualitative des caractéristiques

Ces caractéristiques peuvent être : chimiques, physiques, mécaniques, etc.

Fixer ces caractéristiques, c'est opérer une classification des produits en faisant appel à l'une ou à plusieurs d'entre elles.

Par exemple :

Point de vue chimique. — *Définition d'une fonte ordinaire.*

Est considérée comme *fonte primaire ou ordinaire* toute fonte contenant :

Manganèse $\leq$ 5 %. Silicium $<$ 5 %;

Phosphore $\leq$ 0,5 %;

Soufre, chrome, nickel, cuivre $<$ 0,2 %.

Comme *fonte spéciale*, toute fonte contenant des teneurs supérieures d'un ou plusieurs éléments (définition standard, fascicule A^1-2 de la Commission permanente de Standardisation, 4 juin 1920).

Pureté supérieure d'un acier :

La pureté supérieure d'un acier est définie par les relations suivantes :

Phosphore $<$ 0,04; soufre $<$ 0,04.

(Définition standard. — Unification de la nomenclature des produits métallurgiques, 10 juin 1919), etc.

Classification de l'Aluminium :

La classification de l'aluminium est basée sur l'analyse chimique.

Première catégorie. — Celle pour laquelle le titre est supérieur ou égal à 99,5 % d'aluminium.

Deuxième catégorie. — Celle pour laquelle le titre est compris entre 99 et 99,5 % d'aluminium.

Troisième catégorie. — Celle pour laquelle le titre est compris entre 98 et 99 % d'aluminium.

(Définition du Cahier des Charges standard relatif à la fourniture de l'aluminium à l'Aéronautique).

POINT DE VUE PHYSIQUE ET MÉCANIQUE. — *Définition des aciers et fontes.*

(Définition standard de la Commission permanente de Standardisation, 4 juin 1920.)

Acier. — Produit sidérurgique obtenu en passant par l'état liquide et malléable.

Fonte. — Produit sidérurgique obtenu en passant par l'état liquide et non malléable, etc.

Définition des alliages légers à haute résistance.

Indépendamment des caractéristiques mécaniques, les alliages légers à haute résistance sont définis par une densité au plus égale à 2,9 (Cahier des Charges standard pour la fourniture des alliages légers à l'Aéronautique).

Point de vue mécanique. — Les caractéristiques mécaniques représentées par la résistance, la limite élastique, l'allongement, la résilience, la dureté, etc., sont exprimées soit par des chiffres représentant une limite inférieure et une limite supérieure encadrant les produits, soit par des chiffres minima, au-dessous desquels il ne faut pas descendre.

Exemple : Acier demi-dur. — Résistance min. 55 kg.;
Résistance max. 65 kg; — A % > 10.

Aluminium en tôles ou bandes. — R min. 9 kg; A % min. 38.

Alliages légers à haute résistance .— R. min. 38 kg; E min. 22 kg; A % min. 16, etc.

Les standards de qualité définissent donc physiquement, chimiquement et mécaniquement les produits.

II. — Spécification standard des méthodes, machines ou appareils mettant en évidence les caractéristiques définissant les produits.

Là encore, nous nous trouvons dans la nécessité de définir ou « normaliser » ces méthodes sous peine de faire perdre aux résultats obtenus toute signification.

Des exemples, donnés dans le domaine chimique et dans le domaine mécanique, illustrent cette constatation.

POINT DE VUE CHIMIQUE.

L'expérience a mis en évidence que des analyses chimiques faites avec des procédés différents conduisent aux résultats les moins concordants et par conséquent les plus trompeurs.

C'est ainsi que, pendant la guerre, le Service industriel de l'Aéronautique a fait analyser par quatorze laboratoires bien outillés des tournures d'acier nickel-chrôme bien divisées et bien mélangées en prenant toutes les précautions d'usage pour l'établissement d'un échantillon moyen, en laissant toute liberté sur le choix de la méthode d'analyse.

On a observé les écarts les plus considérables.

Le tableau suivant exprime : la moyenne des résultats: le minimum des résultats; l'écart extrême: l'écart extrême exprimé en % de la valeur moyenne.

	CARBONE	MANGANÈSE	SILICIUM	SOUFRE	PHOSPHORE	NICKEL	CHROME
Moyenne des resultats . . .	0,412	0,342	0,136	0,043	0,028	3,681	[illegible],695
Minimum des résultats . . .	0,34	0,26	0,07	0,027	0,010	3,54	0,57
Maximum des résultats. . .	0,49	0,59	0,23	0,061	0,038	4,0[illegible]	0,82
Écart extrême	0,15	0,33	0,16	0,034	0,028	0,48	0,25
Écart en % de la valeur moyenne	35 %	95 %	120 %	80 %	100 %	15 %	35 %

De semblables résultats semblent déconcertants.

En dehors de l'équation personnelle de l'opérateur, qui joue un

rôle important, on trouve comme élément perturbateur la multiplicité des méthodes.

Le maximum de soufre, pour un métal de pureté supérieure, étant 0,04, sept laboratoires sur quatorze auraient refusé l'acier en question.

C'est donc faire perdre toute valeur à l'analyse chimique que de ne pas procéder à l'unification des méthodes.

Cette unification a été faite dans les Cahiers des Charges de l'Aéronautique relatifs à la fourniture des aciers et de l'aluminium en lingot.

Point de vue mécanique :

Les appareils destinés à contrôler des caractéristiques mécaniques sont multiples. Les types de machines de traction, d'appareils de choc, de dureté minéralogique ou scléroscopique sont variés. Il est difficile d'en adopter un à l'exclusion des autres. Ce n'est même pas souhaitable. Se cristalliser dans un type d'appareil, c'est presque enrayer le progrès.

L'essentiel est d'obtenir des résultats sensiblement identiques avec les différents types.

Dans ce cas, la normalisation, c'est le *tarage et la réglementation des conditions expérimentales*.

Tarage : Tout appareil doit donc se prêter à un tarage facile. Une machine de traction gagnera en précision si on peut en opérer le contrôle à l'aide de poids marqués ou de rondelles d'un poids déterminé.

Un appareil de choc, sur barreaux entaillés, devra permettre le contrôle de la force vive mise en jeu et la force vive abosrbée par la rupture de l'éprouvette, etc.

Réglementation des conditions expérimentales : Les conditions expérimentales influent sur les résultats d'une façon prépondérante.

Ce sont par exemple : la vitesse de traction; la vitesse d'impact dans le choc; la vitesse de la mise en pression et la durée de la pression pour la dureté, etc.

Ce sont là des facteurs qui agissent indépendamment des appareils.

Ils ont besoin d'être précisés, c'est-à-dire unifiés. C'est ce qui a été fait dans les Cahiers des Charges de l'Aéronautique.

L'absence des clauses réglementant ces conditions d'essais, ferait perdre toute valeur et toute comparabilité aux résultats obtenus.

III. — Définition standard des éprouvettes soumises aux essais.

Les résultats perdent également toute valeur si les éprouvettes d'essais ne sont pas « normalisées » ou n'obéissent pas à une loi déterminée.

C'est ainsi que l'allongement pour 100 des métaux, sousmis à la traction, n'a de signification que si la longueur entre repères est reliée à la section par la relation :

$$L^2 = 66{,}67\ S \text{ (loi de similitude)}$$

La *résilience* n'a aucune signification, si les dimensions de l'éprouvette et la forme de l'entaille ne sont pas normalisées.

Omettre cette unification, c'est enlever aux résultats toute valeur et toute comparabilité. C'est la suppression pure et simple d'une caractéristique dont la valeur est indéniable pour l'appréciation des produits métallurgiques.

IV. — Adoption d'une terminologie standard.

L'absence d'une terminologie standard entraîne les erreurs et les confusions les plus regrettables.

Quelques exemples nous édifieront à ce sujet.

Limite élastique :

Prenons le cas de la « limite élastique » E.

Cette caractéristique a été jusqu'ici la plus négligée, et cependant, sa détermination a une importance primordiale, puisqu'elle constitue le point de départ du taux de sécurité.

Avant d'introduire la caractéristique E dans un Cahier des Charges, il est nécessaire de lui donner une définition « standard ».

Nous avons la limite élastique *théorique*, la limite *élastique proportionnelle*, la limite *élastique apparente*. Les résultats varient suivant le choix.

Aussi a-t-on établi une limite « standard » dite « limite pratique », définie comme suit :

« Pratiquement, on admet que la clause fixant pour la limite élastique une valeur de n kg est remplie, si l'éprouvette ayant été soumise à la charge correspondant aux n kg par millimètre carré

pendant dix secondes, puis déchargée, revient à sa longueur primitive à 1/500 près de la longueur entre repères. »

B. — Standards de forme.

Les standards de qualité, ou standards techniques (caractéristiques, contrôle, terminologie) ayant été établis, il reste à déterminer les standards de forme destinés à préciser les dimensions des produits et à limiter le nombre de types.

C'est l' « industrialisation » du standard qualité, permettant :

L'abaissement du prix de revient; la constitution d'approvisionnements, ayant pour corollaire la diminution des délais de livraison; l'interchangeabilité.

Ce sont là les trois éléments du travail en série, condition de la production intensive au moment opportun.

Certes, les différents producteurs se sont préoccupés, chacun dans leur partie, de limiter les formes des produits et ont déterminé, dans leurs catalogues industriels, un certain « échantillonnage » correspondant aux produits courants le plus communément demandés.

Cet échantillonnage n'est d'ailleurs pas exclusif d'autres modèles.

La demande fait naître des échantillons nouveaux.

Ceux-ci se multiplient à l'infini.

Cette multiplication nécessite l'existence d'un *outillage considérable*, ce qui augmente le prix de revient ou la création d'un nouvel outillage pour satisfaire à une demande de produits hors série, ce qui augmente à la fois le prix de revient, le délai de livraison et diminue la rapidité de production.

Il en serait tout autrement si l'on pouvait obtenir la spécification et la limitation rationnelles des formes.

Comment aboutir à ce résultat?

La spécification sera rationnelle :

1° Si elle permet la construction répondant aux conditions techniques exigées avec le minimum de poids en éléments « qualitativement standards ». Nous acquerrons de ce chef l'économie et la légèreté dans la sécurité.

2° Si la spécification d'un élément entraîne partiellement ou totalement celle des autres éléments d'assemblage, de sorte qu'un

élément principal étant déterminé, tous les autres se trouvent déterminés de ce fait.

La détermination d'un profilé entraînera celle de rivets, boulons, barres, tendeurs, etc.

La limitation sera technique et rationnelle :

3° Si dans la suite formée par les différents termes de la série standard, chaque terme se déduit du précédent par une loi faisant varier méthodiquement et rationnellement les masses, poids, moments d'inertie des éléments mis en œuvre.

Valeur de l'échelonnement :

Les directives données à ces sujets dans le fascicule XI de la Commission permanente de Standardisation (travaux de la Sous-Commission X, présidée par M. Rateau et ayant comme rapporteur M. Caquot), sont les suivantes :

« L'échelonnement ne doit pas être trop serré, le prix de la main-d'œuvre et de l'outillage des éléments à construire étant d'autant plus élevé que le nombre des types est plus grand. Par contre, le prix de la matière première diminuant quand le nombre des types augmente, en raison de la diminution de l'écart entre la dimension normalisée et la dimension strictement nécessaire, cette considération tend à augmenter le nombre des éléments à construire quand le prix de la matière devient l'élément prépondérant du prix.

« L'échelonnement sera d'autant *plus serré* que la matière représentera une part plus importante du prix de l'objet et au contraire, d'autant plus large que l'objet coûtera plus de main-d'œuvre et d'outillage. »

La progression géométrique est seule rationnelle. — Il a été admis que les écarts devaient être proportionnels aux dimensions, ce qui conduit comme loi à la « progression géométrique ».

En effet, soit une série d'éléments standardisés dont les poids sont :

$$a_1, a_2, a_3, \ldots a_p$$

L'élément donnant le maximum d'économie, dans un cas particulier, tombera par exemple entre a_2 et a_3.

En le remplaçant par l'élément normalisé le plus voisin, le gaspillage du métal sera au plus de :

$$\frac{a_3 - a_2}{2}$$

Ce qu'il faut chercher, c'est que le *gaspillage proportionnel du métal soit constant.* On peut se permettre un gaspillage chiffré en kilos, quand on travaille sur des kilos, et en tonnes quand on travaille sur des tonnes.

Le gaspillage proportionnel du métal sera constant si :

$$\frac{(a_3 - a_2)}{2\,a_2} = \frac{(a_{p+1} - a_p)}{2\,a_p}$$

Donc, il faut que :

$$\frac{(a_{p+1} - a_p)}{2\,a_p} = C^{te}$$

ou :

$$\frac{(a_{p+1} - a_p)}{a_p} = C^{te}$$

ou :

$$\frac{a_{p+1}}{a_p} = C^{te}$$

C'est-à-dire que les *éléments aient des poids en progression géométrique.*

Nous tirons donc les conclusions suivantes :

1° La série des standards de forme doit être en progression géométrique;

2° Pour répondre aux considérations exposées relatives à l'échelonnement, on devra adopter une *série principale* à échelonnements suffisamment larges, et *des séries accessoires* obtenues en intercalant entre les termes de la série principale les termes d'une *série secondaire*, puis d'une série *tertiaire*, ces nombres formant avec les premiers une progression géométrique continue.

Choix de la raison de la progression :

Cette raison sera d'autant plus voisine de 1 qu'on recherchera un échelonnement plus serré.

Mais d'autre part, il est nécessaire que la base soit décimale.

Le colonel Renard avait adopté, pour les cordages d'aérostation, une série dont la progression géométrique pour les sections était $\sqrt[5]{10}$, de sorte que de cinq en cinq éléments, les sections étaient décuplées.

Les chiffres de la progression, arrondis, étaient :

10, 16, 25, 40, 64, 100, etc.

La Sous-Commission, présidée par M. Rateau, a fait adopter par la Commission permanente d'Unification, comme raison de la progression :

$$\sqrt[10]{10}, \text{ soit } 1{,}259 \text{ à } 1/10\,000^{e} \text{ près.}$$

en signalant les avantages suivants :

$\sqrt[10]{10}$ est très sensiblement égal à $\sqrt[3]{2}$ à moins de 1/1.000^{e} près.

$$\sqrt[3]{2} = 1{,}2599$$
$$\sqrt[10]{10} = 1{,}2589$$

Si donc l'on prend des objets qui se suivent, les éléments linéaires sont en rapport 1,259, les éléments superficiels dans le rapport 1,59, les éléments de volume dans le rapport 2.

Série principale. — La série principale entre 10 et 100, est donc :

10 —	12,5 —	16
20 —	25 —	32
40 —	50 —	64
	80 —	100

obtenus en arrondissant les nombres théoriques (1).

Ces nombres sont simples et faciles à retenir.

Il suffit de se rappeler le premier groupe de 3 pour deduire les groupes suivants :

En effet, chaque élément d'un groupe de 3 se déduit de l'élément correspondant du groupe de 3 précédent; en multipliant par 2 la valeur de cet élément.

De 10 en 10, la valeur des éléments est multipliée par 10.

Série secondaire. — Elle est sensiblement la progression géométrique ayant pour raison $\sqrt[20]{10}$.

Les intercalaires sont donc :

11,2—14—18—22,4—28—36—45—56—72 et 90

Série tertiaire. — Exceptionnellement, si l'on veut un échelon-

---

(1) Les écarts entre ces nombres et les nombres théoriques sont inférieurs à 1 %, sauf 32 pour lequel l'écart est inférieur à 1,17 %.

nement très rapproché, on peut utiliser une progression géométrique ayant sensiblement pour raison $\sqrt[40]{10}$, à savoir :

10,6—11,8—13,2—15—17—19
21,2—23,6—26,5—30—34—38
42,5—47,5—53—60—68—76
85—95

Calcul des éléments relatifs à la résistance des matériaux au moyen de la série « Standard » :

Les éléments principaux sont .
Les section S;
Les moments d'inertie I;
Les $\frac{I}{\rho}$;
Les rayons de giration r;
Les moments statiques μ.

Pour chaque terme de la série, ces éléments ont une valeur particulière.

Prenons un certain terme de la série principale comme terme de base.

Soit λ le rang ou l'éloignement d'un terme au terme de base.

Pour le terme de base, l'éloignement sera représenté par λ_0.

Les termes inférieurs de la série auront successivement les rangs λ-1, λ-2, λ-3, etc., au fur et à mesure qu'ils s'éloignent du terme de base.

Les termes supérieurs de la série auront successivement les rangs $\lambda + 1$, $\lambda + 2$, $\lambda + 3$, etc., au fur et à mesure qu'ils s'éloignent du terme de base

A chaque terme λ correspond un groupe d'éléments.

$$S,\ I,\ \frac{I}{\rho},\ r \text{ et } \mu$$

Au terme de base λ_0 correspond :

$$S_0,\ I_0\ \left(\frac{I}{\rho}\right)_0,\ r_0 \text{ et } \mu_0$$

Au terme λp correspond :

$$Sp,\ Ip,\ \left(\frac{I}{\rho}\right)_p,\ rp \text{ et } \mu p$$

Cherchons la relation qui unit un élément du groupement p à l'élément correspondant du groupement de base λ_0.

Si nous appelons α la raison de la progression géométrique, nous avons :

$$\begin{aligned} \alpha &= \sqrt[10]{10} = 1.25 \\ \alpha^2 &= 1,6 \\ \alpha^3 &= 2 \\ \alpha^4 &= 2,5 \end{aligned}$$

Nous avons :

$$Sp = S_0\,(\alpha^2)^p = S_0\,(1,6)^p$$
$$Ip = I_0\,(\alpha^4)^p = I_0\,(2,5)^p$$
$$\left(\frac{I}{\rho}\right)_p = \left(\frac{I}{\rho}\right)_0 (\alpha^3)^p = \frac{I_0}{\rho_0}\,2^p$$
$$rp = r_0\,\alpha^p = r_0\,(1,25)^p$$
$$\mu p = \mu_0\,(\alpha^3)^p = \mu_0\,2^p$$

ce qui donne la valeur des éléments de rang p en fonction des éléments de base.

Nous avons donc à calculer les puissances successives, positives et négatives de :

1,25—1,6—2—2,5

Si nous nous bornons aux cinq termes au-dessus du terme de base et aux cinq termes au-dessous de ce terme, nous avons :

$\overline{1,25}^{1} = 1,25$	$\overline{1,25}^{-1} = 0.8$
$\overline{1,25}^{2} = 1,6$	$\overline{1,25}^{-2} = 0.64$
$\overline{1,25}^{3} = 2$	$\overline{1,25}^{-3} = 0.5$
$\overline{1,25}^{4} = 2.5$	$\overline{1,25}^{-4} = 0,4$
$\overline{1,25}^{5} = 3,2$	$\overline{1,25}^{-5} = 0,32$
$\overline{1,6}^{1} = 1,6$	$\overline{1,6}^{-1} = 0,64$
$\overline{1,6}^{2} = 2,5$	$\overline{1,6}^{-2} = 0,40$
$\overline{1,6}^{3} = 4$	$\overline{1,6}^{-3} = 0.25$
$\overline{1,6}^{4} = 6,4$	$\overline{1,6}^{-4} = 0,16$
$\overline{1,6}^{5} = 10$	$\overline{1,6}^{-5} = 0,1$
$2^{1} = 10$	$2^{-1} = 0.5$
$2^{2} = 4$	$2^{-2} = 0,25$
$2^{3} = 8$	$2^{-3} = 0,125$
$2^{4} = 16$	$2^{-4} = 0,064$
$2 = 32$	$2^{-5} = 0.032$

$$\overline{2,5}^{1} = 2,5 \qquad \overline{2,5}^{-1} = 0,4$$
$$\overline{2,5}^{2} = 6,4 \qquad \overline{2,5}^{-2} = 0,16$$
$$\overline{2,5}^{3} = 16 \qquad \overline{2,5}^{-3} = 0,064$$
$$\overline{2,5}^{4} = 40 \qquad \overline{2,5}^{-4} = 0,025$$
$$\overline{2,5}^{5} = 100 \qquad \overline{2,5}^{-5} = 0,01$$

On a donc le tableau suivant :

λ	S	I	$\frac{I}{v}$	r	μ
— 5	$S_0 \times 0,1$	$I_0 \times 0,01$	$\frac{I_0}{v_0} \times 0,032$	$r_0 \times 0,32$	$\mu_0 \times 0,032$
— 4	$S_0 \times 0,16$	$I_0 \times 0,025$	$\frac{I_0}{v_0} \times 0,064$	$r_0 \times 0,4$	$\mu_0 \times 0,064$
— 3	$S_0 \times 0,25$	$I_0 \times 0,064$	$\frac{I_0}{v_0} \times 0,125$	$r_0 \times 0,50$	$\mu_0 \times 0,125$
— 2	$S_0 \times 0,4$	$I_0 \times 0,16$	$\frac{I_0}{v_0} \times 0,25$	$r_0 \times 0,64$	$\mu_0 \times 0,25$
— 1	$S_0 \times 0,64$	$I_0 \times 0,4$	$\frac{I_0}{v_0} \times 0,5$	$r_0 \times 0,8$	$\mu_0 \times 0,5$
0	S^0	I^0	$\frac{I^0}{v^0}$	r^0	μ^0
+ 1	$S_0 \times 1,6$	$I_0 \times 2,5$	$\frac{I_0}{v_0} \times 2$	$r_0 \times 1,25$	$\mu_0 \times 2$
+ 2	$S_0 \times 2,5$	$I_0 \times 6,4$	$\frac{I_0}{v_0} \times 4$	$r_0 \times 1,6$	$\mu_0 \times 4$
+ 3	$S^0 \times 4$	$I_0 \times 16$	$\frac{I_0}{v_0} \times 8$	$r_0 \times 2$	$\mu_0 \times 8$
+ 4	$S_0 \times 6,4$	$I_0 \times 40$	$\frac{I_0}{v_0} \times 16$	$r_0 \times 2,5$	$\mu_0 \times 16$
+ 5	$S_0 \times 10$	$I_0 \times 100$	$\frac{I_0}{v_0} \times 32$	$r_0 \times 3,2$	$\mu_0 \times 32$

L'Aéronautique française a été la première à adopter la « série Renard ».

Ses cahiers des charges (tôles, tubes, profilés, cornières, etc...) sont établis en fixant des dimensions basées uniquement sur cette série.

§ 3. Quelques aperçus sur une normalisation internationale. — En se plaçant à un point de vue tout différent, celui des rapports économiques entre peuples, il est certain qu'ils seront singulièrement facilités par l'adoption universelle de certains standards.

Le premier «standard» est évidemment le mètre.

L'adoption du système métrique par les peuples « anglo-saxons » serait en effet de nature à faciliter singulièrement les échanges. Malgré les gros obstacles rencontrés, à ce sujet, on peut espérer cependant que ce résultat sera atteint dans un avenir plus ou moins éloigné.

En attendant, on ne peut guère unifier que la terminologie et la classification des produits.

Le contrôle des qualités se trouve très entravé par la diversité des appareils d'essais et la diversité des éprouvettes de mesure.

Nous avons dit que la *résilience* par exemple, n'avait de signification que si l'éprouvette et l'entaille étaient nettement déterminées.

Aucune formule de corrélation n'existe pour passer d'une éprouvette à une autre.

Dans ces conditions, pendant la guerre, on a eu les difficultés les plus grandes à établir une comparaison entre la résilience décelée en Angleterre au moyen du pendule Izod et en France au moyen du pendule Charpy.

Il y avait diversité d'appareils, diversité d'éprouvettes et diversité d'entaille.

Il n'y a pas de corrélation entre les allongements de traction anglais et les allongements de traction français.

Cela tient à ce que la loi de similitude qui établit les « standards » de traction :

$$L^2 = 66,67 \; S$$

n'est pas adoptée en Angleterre.

Nos alliés nous fournissaient pendant la guerre des matières premières qui devaient avoir des caractéristiques déterminées, il a été très difficile, sinon impossible, d'exercer certains contrôles dans les méthodes, les appareils et les mesures.

Des tentatives d'unification interalliée, nécessitées par des divergences, se sont manifestées.

Puis ces efforts se sont à peu près ralentis, l'après-guerre ayant absorbé les énergies vers des travaux d'un autre ordre.

Lorsque les préoccupations multiples qui assiègent les divers peuples auront diminué d'intensité, nous croyons qu'une entente,

ayant pour résultat l'adoption du système métrique, base commune d'un accord, interviendra.

Quoi qu'il advienne et dans l'état actuel des choses, nous devons signaler que la série standard qui a été adoptée, c'est-à-dire la série en progression géométrique avec $\sqrt[10]{10}$ comme raison, donne pratiquement satisfaction au système anglo-saxon.

En effet, le pouce anglais a pour longueur $2^{cm}54$.

Les multiples par 2 et les sous-multiples forment une suite de nombres qui coïncident avec la série principale avec une approximation analogue à celle des puissances de $\sqrt[10]{10}$ comme le montre le tableau suivant :

4 pouces	...	101.6	...	série principale	100
2 —	...	50.8	...	—	50
1 —	...	25.4	...	—	25
1/2 —	...	12.7	...	—	12.5
1/4 —	...	6.35	...	—	6.3
1/8 —	...	3.17	...	—	3.2
—	...	1.59	...	—	1.6
—	...	0.794	...	—	0.8
—	...	0.397	...	—	0.4

Cette constatation donne à la série si intéressante du colonel Renard une valeur « internationale » de premier ordre.

Ajoutons que l'Allemagne a adopté cette série et tient la main à son application.

En résumé, nous estimons que l'unification internationale a pour les transactions commerciales et pour les fournitures entre les différents peuples une importance indéniable. Elle devra être poursuivie, au fur et à mesure que les possibilités s'offriront.

La France, de son côté, a le désir le plus vif qu'une entente complète ait lieu au plus tôt à ce sujet.

CHAPITRE XV

CAHIERS DES CHARGES

Standards de qualité et standards de forme servent de base à la rédaction des cahiers des charges qui indiquent les conditions de réception et stipulent les essais imposés.

D'une façon générale, deux catégories d'essais ont été adoptés :

1° Les *essais par prélèvement ;*

2° Les *essais individuels.*

L'essai par *prélèvement* est un essai qui caractérise l'ensemble d'un lot, le lot étant nettement défini, se rattachant à la coulée ou à un ensemble de coulées pour les produits naturels et se rattachant à un certain tonnage pour les produits transformés.

L'essai par prélèvement peut donner lieu à un ou plusieurs contre-essais, conformément aux clauses précisées dans les cahiers des charges.

Il détermine la réception ou le rebut du lot.

Cet essai de prélèvement caractérisant les qualités d'ensemble d'un lot et assurant un minimum de déchet, c'est-à-dire un maximum d'utilisation, a paru insuffisant pour l'aéronautique.

Un fléchissement dans les qualités d'une seule pièce étant susceptible d'occasionner un accident mortel, il a semblé qu'il était indispensable de compléter l'essai par prélèvement par un *essai individuel* permettant de déceler les défauts particuliers incompatibles avec l'emploi.

Naturellement l'essai individuel doit être judicieusement choisi pour être rapide et significatif, l'élément rapidité ayant son intérêt pour ne pas apporter de retard dans l'expédition ou l'utilisation des pièces.

La technique de ces deux catégories d'essais a été réglée d'après les considérations précédentes.

L'essai d'*emploi*, c'est-à-dire l'essai correspondant le plus à l'utilisation ultérieure de la matière, a été recherché particulièrement

soit comme essai de prélèvement, soit comme essai individuel, de façon à qualifier les produits métallurgiques, dans les éléments les plus intéressants relevant de cette investigation.

Dans le deuxième volume, nous donnerons le « Tableau Standard » des aciers spéciaux ainsi que le cahier des charges relatives à la fourniture desdits aciers (blooms, billettes, pièces de forge) établi par l'Aéronautique.

Nous donnerons également dans le même volume les cahiers des charges relatifs à un certain nombre de produits métallurgiques autres que le fer.

TABLE DES MATIÈRES

TITRE III

LES TRAITEMENTS

TITRE IV

RECHERCHES ET CONTROLE
CAHIERS DES CHARGES ET STANDARDISATION

IMPRIMERIE BERGER-LEVRAULT, NANCY-PARIS-STRASBOURG — 1929